

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Trakční motory - historický vývoj
Traction Motors - Historical Development

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student:

Michal Petružela

Studijní program:

B2645 Elektrotechnika, sdělovací a výpočetní technika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Trakční motory - historický vývoj
Traction Motors - Historical Development

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Popište základní konstrukci elektrických motorů, princip působení
3. Trakční motory, výskyt, provedení, odlišnosti
4. Historický vývoj trakčních strojů až do současnosti
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


- KOPYLOV, Igor, Petrovič. Stavba elektrických strojů, 1988, Praha, SNTL/MIR
- CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů, Praha, 1958, SNTL
- KAČOR, Petr. Vybrané typy elektrických strojů, Ostrava, 2010, VŠB-TU Ostrava
- Katalogy a katalogové listy
- Odborné a technické www stránky
- Technické normy

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

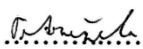



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 6. 5. 2013


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Petru Kačorovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je přiblížit vývoj konstrukce trakčních motorů jako celku, tak i jejich částí. Na začátku je teoretický úvod týkající se konstrukce elektrických točivých strojů, výhod a nevýhod trakčních motorů a možnosti jejich umístění v lokomotivě. Poté je kratší úsek zabývající se napájecími sítěmi pro vozidla poháněná trakcí. Načež následuje popis změn jednotlivých částí trakčních motorů a jejich standardizace, následovaný částí o zkoušení nového způsobu uložení vinutí rotoru a dále je obecnější část týkající se stejnosměrných motorů z roku 1994, za níž je psáno o počátcích třífázových motorů, jejich průběžném rozvoji a stavu v roce 1992. Konec patří vývoji elektrické trakce a lokomotiv pro ni v České republice.

Klíčová slova

Trakční motor, elektrická trakce, stejnosměrný motor, asynchronní motor, synchronní motor, vývoj, třífázový trakční motor, elektrická lokomotiva.

Abstract

The aim of this bachelor's thesis is to show historical development of traction motors and their components. At the start is theoretical introduction about the design of electric rotating machinery, advantages and disadvantages of traction motors and their placement in locomotives. Thereafter is short passage about electrification systems which supply traction drives. Then is characterization of changes in some parts of traction motors, followed by part about experimental armature winding and general part from 1994 concerning the DC traction motors, next one is about beginning and development of three-phase traction motors. End is about development and expansion of electric railway traction and electric locomotives in Czech Republic.

Key words

Traction motor, electric traction, DC motor, induction motor, synchronous motor, development, three-phase traction motor, electric locomotive.

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Anglický význam	Český význam
ČSD	Czechoslovak state railways	Československé státní dráhy
GTO	Gate turn-off	Hradlem vypínaný
IGBT	Insulated gate bipolar transistor	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
USA	United States of America	Spojené státy americké

Obsah

1	Úvod	1
2	Teoretický úvod.....	2
	2.1 Elektrické točivé stroje	2
	2.2 Základní uspořádání točivých strojů	2
	2.2.1 Magnetický obvod stroje	2
	2.2.2 Vinutí elektrických strojů	3
	2.3 Trakční motor	4
	2.3.1 Výhody a nevýhody	4
	2.4 Stejnosměrný motor	5
	2.4.1 Sériový motor	5
	2.4.2 Cize buzený motor	5
	2.5 Uspořádání elektrického pohonu	6
3	Napájení	8
	3.1 Stejnosměrné napájení	8
	3.2 Střídavé napájení	8
4	Vývoj konstrukce trakčních motorů v období 1924 až 1949.....	9
	4.1 Porovnání motorů rychlost/výkon	9
	4.2 Nový typ rotorových ložisek	11
	4.3 Převody	11
	4.4 Motor s dvojitou redukcí	12
	4.5 Komutátor	12
	4.6 Kartáče	13
	4.7 Svazování a drážkování	13
	4.8 Převíjecí obvazování	13
	4.9 Motory připevněné ke karoserii vozidla	14
	4.10 Ventilace	14
	4.11 Izolace	14
	4.12 Pokles používání odlitků	16
	4.13 Elektrická konstrukce	16
	4.14 Standardizace	17

4.15	Údržba a výměna jednotek	18
5	Stejnoseměrný trakční motor s bezdrážkovým rotorem v roce 1985	19
5.1	Pokusný stroj	19
5.2	Komutace.....	20
5.3	Ztráty	21
5.4	Poruchové stavy	22
5.5	Výsledek testů	22
6	Pohled na stejnosměrné trakční motory v roce 1994.....	23
7	Třífázový trakční motor.....	25
7.1	Třífázová trakční soustava.....	25
7.2	Dělení fází	26
7.3	System Kandó.....	27
7.4	Poválečný vývoj	29
7.5	První pokusy o stavbu lokomotivy s třífázovým střídačem	30
7.6	Vznik moderního třífázového trakčního motoru	30
7.7	Lokomotiva DB řady 120 a její význam	32
8	Počátek elektrické trakce na území Česka.....	34
8.1	Elektrické střídavé lokomotivy.....	34
8.2	Lokomotiva Škoda 109E	35
9	Závěr.....	Chyba! Záložka není definována.
10	Použitá literatura.....	38
11	Zdroje obrázků	39
	Seznam příloh.....	Chyba! Záložka není definována.

1 Úvod

Od objevení principu stejnosměrného motoru v roce 1873 Zénobe Grammem se lidé snažili tento objev co nejvíce využívat a rozvíjet. A když Werner von Siemens dne 31. května 1879 představil svou elektrickou lokomotivu na průmyslové výstavě v Berlíně, bylo zřejmé, že na další rozvoj využití elektromotorů v železniční dopravě se nebude muset dlouho čekat. Vývoj motorů pro lokomotivy, ale i tramvaje nabral ve 20. století rychlé tempo a začal vytlačovat parní trakci a měnit lokomotivy se spalovacími motory na hybridní, kde se používá spalovací motor na výrobu elektřiny pro trakční motory.

Tato práce se snaží popsat vývoj některých motorů a jejich částí. Dále vliv objevů na rozšíření jednotlivých typů trakčních motorů a počáteční problémy spojené při jejich aplikaci nebo vývoji. Také je zmíněno několik průkopnických zlepšení, která posunula vývoj kupředu.

2 Teoretický úvod

2.1 Elektrické točivé stroje

Mezi točivé stroje řadíme všechny elektrické stroje, ve kterých dochází k přeměně elektrické energie na mechanickou (motory) a opačně, tedy přeměně mechanické energie na elektrickou (generátory). Mechanická energie je dodávána nebo odebírána na hřídeli stroje, které se při jeho činnosti otáčí, odtud název točivé.

Elektrická energie je dodávána či odebírána z vinutí, které je nejčastěji umístěné na statoru stroje. V každém elektrickém stroji může být směr přeměny energie změněn na směr opačný. Mechanická energie dodávána přes hřídel do stroje může být změněna na elektrickou energii. Naopak, elektrická energie přiváděná do vinutí téhož stroje může být změněna na mechanickou. Z toho vyplývá, že každý generátor může pracovat jako motor a motor jako generátor. Této vlastnosti se říká vratnost energie elektrického stroje. V praxi se většina strojů navrhuje pouze pro jeden směr přeměny energie, ve kterém převážně pracuje, i když během provozu se mohou vyskytnout případy, kdy stroj pracuje v opačném směru toku energie, např. jeřábový asynchronní motor při spouštění břemene, trakční motor při brzdění (tramvaj sjíždějící kopec) apod. [6]

2.2 Základní uspořádání točivých strojů

Konstrukce točivých strojů je velice rozmanitá a závisí nejen na výkonu a použití stroje v konkrétní aplikaci, ale také na dalších okolnostech (napájení, chlazení, poloha, prostředí, ve kterém pracuje atd). Přes tuto různorodost však můžeme v každém točivém stroji nalézt čtyři základní skupiny částí:

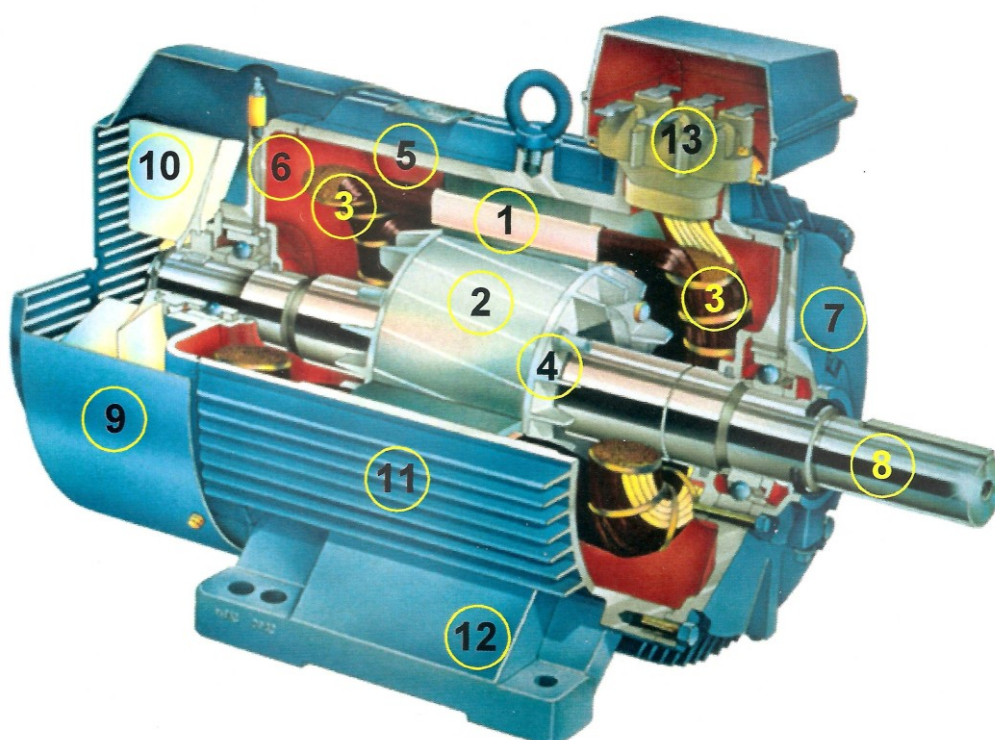
- **Magnetický obvod**, složený obvykle z feromagnetického materiálu (nejčastěji plechů)
- **Elektrický obvod vstupní**, většinou tvořený měděným vinutím (méně častěji hliníkovým)
- **Elektrický obvod výstupní**, opět tvořený vinutím (Cu, Al)
- **Konstrukční části umožňující činnost stroje**, jako jsou kostra, štíty, ložiska, ventilace, hřídel apod. Souhrnně tvoří elektrický točivý stroj kompaktní celek.

Příklad konstrukčního uspořádání běžného stroje (asynchronního motoru) je vidět na obr.č.1. [6]

2.2.1 Magnetický obvod stroje

Lze rozdělit na část statorovou a rotorovou, které jsou navzájem odděleny vzduchovou mezerou, aby se rotor mohl volně otáčet. Stator i rotor je v případě střídavých strojů složen z plechů pro elektrotechniku z důvodů snížení ztrát vířivými proudy. Tloušťka plechů je zde vyšší než u transformátorů, nejčastěji 0,5mm. U stejnosměrných strojů je pak stator vyroben z oceli nebo ocelolitin a rotor je opět složen z plechů pro elektrotechniku.

U elektrických točivých strojů jsou vinutí na statoru i na rotoru. U speciálních strojů může být některé vinutí nahrazeno např. permanentními magnety nebo magneticky tvrdým materiálem. [6]



Obr. 1 – Základní popis točivého stroje, [F1]

Legenda: 1) stator, 2) rotor, 3) statorové vinutí, 4) rotorové vinutí (klec), 5) kostra, 6) přední ložiskový štít, 7) zadní ložiskový štít, 8) hřídel, 9) kryt ventilátoru, 10) ventilátor, 11) chladičí žebra, 12) patky stroje k uchycení, 13) svorkovnice

2.2.2 Vinutí elektrických strojů

Skládá se z cívek, a cívky pak ze závitů. Podle druhu strojů rozlišujeme různé uspořádání vinutí. U stejnosměrných strojů (hlavní a pomocné póly) a u synchronních strojů (budící vinutí) jsou kompaktní cívky umístěny na pólech. Vinutí rozložené v drážkách mají asynchronní stroje, kotvy stejnosměrných a synchronních strojů, kompenzační vinutí stejnosměrných strojů apod.

Statorové případně i rotorové vinutí (funkce statoru a rotoru může být zaměněna) vytváří buď stejnosměrné magnetické pole, které má stálou velikost, směr i smysl (stejnospměrné stroje) nebo točivé magnetické pole (asynchronní stroje, synchronní stroje). Vytvořené pole může být také pulzující (střídavé) magnetické pole (jednofázové asynchronní motory) Charakter pole tedy závisí na druhu stroje. [6]

Stator je nejčastěji nalisován do kostry stroje vyrobené z litiny nebo v poslední době také hliníku. Vnější část kostry je opatřena žebry pro účinný odvod tepla vznikajícího ve vinutí stroje a jeho magnetickém obvodu. Ze přední a zadní strany kostry doléhají štíty s ložisky, ve kterých je uložen ocelový hřídel stroje. Zadní strana stroje je právě ta, ze které vychází hřídel stroje. Na horní straně kostry (nemusí to být pravidlem) je umístěna svorkovnice sloužící pro připojení elektrického stroje k síti pomocí kabelů či vodičů. Stroj bývá také vybaven ventilátorem v přední části stroje, tok vzduchu přes žebra je usměrňován krytem ventilátoru. [6]

2.3 Trakční motor

Způsob pohonu hnacích kol motorových vozidel elektrickým motorem se nazývá elektrická trakce. Elektromotor napájený trakcí se označuje trakční motor. Při brzdění dodává trakční motor do sítě proud (tzv. rekuperace).

Při volbě trakčního motoru mají velký význam jeho charakteristiky:

- 1) závislost momentu a otáček na proudu
- 2) závislost otáček na momentu [4]

2.3.1 Výhody a nevýhody

Výhody elektrické trakce:

- 1) Dobrá trakční charakteristika motoru
 - řízení otáček je snadné a hospodárné
 - motor má pomalý rozběh z klidu a velký záběrový moment
 - motor má dostatečný točivý moment a velkou tažnou sílu
- 2) Jednoduché konstrukční přizpůsobení vozidla
 - motor se může tvarově přizpůsobovat
 - potřebný výkon lze rozdělit na více motorů pohánějících jednotlivé nápravy
 - motor má malou hmotnost a malé rozměry, je ořesu vzdorný
- 3) Výhodné provozní vlastnosti
 - provoz neznečišťuje životní prostředí
 - jednoduchá obsluha
 - plynulý chod motoru
 - dlouhá životnost
 - velká energetická účinnost

Nevýhody elektrické trakce:

- 1) vysoké investiční náklady
- 2) závislost na dodávce elektrické energie
- 3) větší odběr v zimě na vytápění vozu [4]

2.4 Stejnosměrný motor

2.4.1 Sériový motor

Výhodnou vlastností tohoto stroje je, že umí pracovat jak na stejnosměrné, tak i na střídavé napětí. U stejnosměrné trakce byl výlučně používán stejnosměrný motor se sériovým buzením, až do zavedení měničové techniky, která umožnila plynulou regulaci cize buzeného motoru.

Základní vlastnosti

Sériový motor má pro trakční účely nejvýhodnější charakteristiky (závislost momentu a otáček na proudu a závislost otáček na momentu). Proud se zvětšuje s druhou odmocninou momentu. Sériový motor je vzhledem ke své měkké otáčkové charakteristice jediný motor, který lze celkem bez problémů řídit stupňovitou změnou napětí (vyřazování předřadných rezistorů). Tento motor je nejvíce přetížitelný (i když jen po omezenou dobu). Při nízkých otáčkách (při rozjezdu, při jízdě do kopce) vyvine motor dostatečně velký moment k rozjezdu a při jízdě po rovině je motor dostatečně rychlý při nižším momentu.

Pro tyto své vlastnosti byl posléze používán i při napájení střídavým napětím (systém 15kV 16²/3Hz) a později stejnosměrným, ale zvlněným proudem (vozidla s usměrňovačem). [1]

2.4.2 Cize buzený motor

Cize buzený stejnosměrný komutátorový motor je podobně jako v jiných pohonech ideálním zdrojem regulovaného točivého momentu z hlediska regulačních vlastností. Podmínkou pro jeho použití je ovšem plynule regulovatelný zdroj pro napájení obvodu kotvy a buzení. To bylo proveditelné u stacionárních zařízení i s pomocí rotačních soustrojí, ale na vozidlech teprve po sestrojení polovodičových měničů potřebného výkonu, řízených usměrňovačů a pulzních měničů. Oba druhy měničů zaznamenaly bouřlivý rozvoj s použitím tyristorů. S nimi tedy začíná i stavba vozidel s cize buzenými motory, i když ne výhradně.

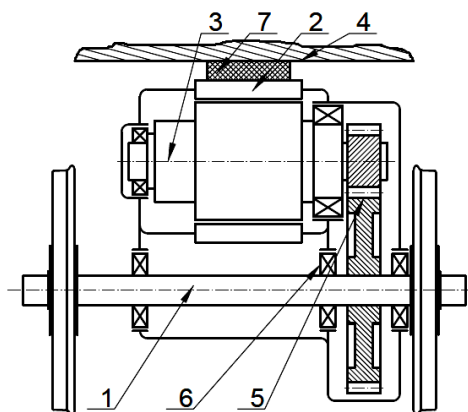
Základní vlastnosti

Cize buzený motor má tvrdé otáčkové charakteristiky, což znamená, že i malé změny napětí působí velké změny proudu a při stálém buzení i tomu odpovídající změny momentu. To je pro vozidla nepřijatelné, a proto je pro napájení kotev cize buzených motorů nezbytné plynulé řízení napětí. [1]

2.5 Uspořádání elektrického pohonu

Součástmi přenosu momentu z motoru na kolo jsou kromě motoru především:

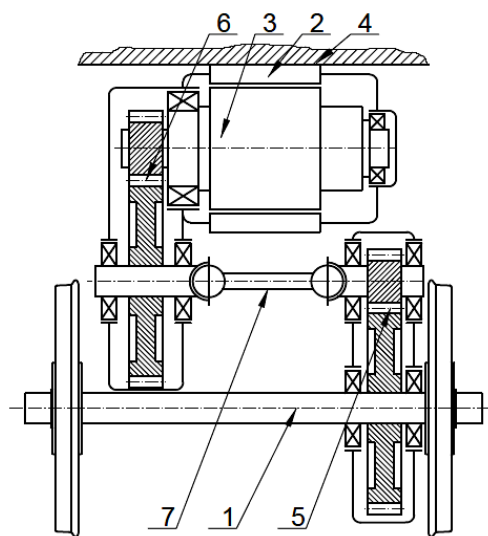
- a) Ozubené převody všech druhů pro změnu poměru momentu a otáček na motoru a na nápravě a pro řešení prostorových problémů (vložené kolo, kuželové převody ap.) [5]



Obr. 2 – Pohon tlakovým motorem, [F2]

Legenda: 1) dvojkolí, 2) stator, 3) rotor, 4) rám, 5) trakční převod, 6) tlapové uložení (tlapy), 7) pružný závěs motoru

- b) Kloubové hřídele a spojky, umožňující přenos momentu mezi částmi, které se mohou navzájem pohybovat (při pružení vozidla, kvůli nevyhnutelným montážním nepřesnostem ap.) [5]

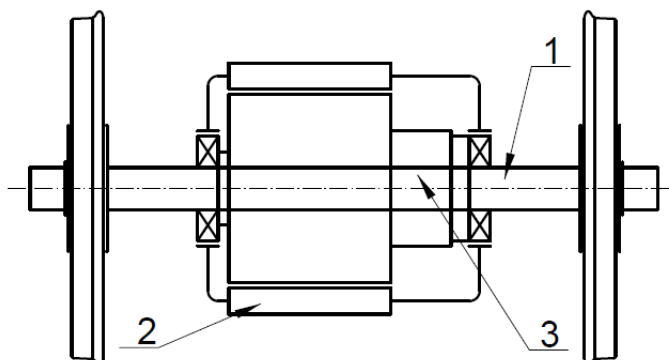


Obr. 3 – Pohon s odpruženým motorem: dvoustupňový převod s vnějším kloubovým hřídelem

Legenda: 1) dvojkolí, 2) stator, 3) rotor, 4) rám, 5) sekundární nápravová převodovka, 6) primární nápravová převodovka, 7) kloubový hřídel, [F3]

- c) Ložiska převážně valivá, která často rozhodují o životnosti celého zařízení.

Trakční motor může být umístěn přímo na hřídeli, kterým potřebujeme otáčet. [5]



Obr. 4 - Pohon neodpruženým motorem, [F4]

Legenda: 1) dvojkolí, 2) stator, 3) rotor

3 Napájení

Vývoj v elektrické trakci na železnici se ubíral dvěma hlavními směry, které odpovídají zavedením nízkonapěťových stejnosměrných přenosových sítí pro pohony se stejnosměrnými motory a nízkofrekvenčních vysokonapěťových sítí ($16\frac{2}{3}$ Hz ve střední Evropě a 25 Hz v USA) se střídavými komutátorovými motory.

Zavedení vysokého napětí s průmyslovým kmitočtem musel počkat do 50. let, kdy byly usměrňovače, zprvu rtuťové a později polovodičové, vyvinuty pro potřebné výkony v trakci. [1]

3.1 Stejnosměrné napájení

Napájení ze zdroje stejnosměrného proudu je historicky nejstarší. Napětí se postupně zvyšovalo tak jak rostly požadavky na výkon vozidel a vzdálenost, na které musel být přenášen. V současné době jsou nejčastěji používána následující napětí:

- 600V nebo 750V pro vozidla MHD
- 1500V pro městské rychlodráhy a železnice
- 3000V pro hlavní dráhy

Omezujícím faktorem při zvyšování napětí byly možnosti stejnosměrných komutátorových motorů, které pro potřebné výkony nelze hospodárně stavět s napětím na komutátoru větším než asi 1500V. Pro napětí troleje 3000V musí být dva motory 1500V (izolované na napětí 3000V, označení 3000/2 V) řazeny trvale do série čímž tvoří tzv. motorové skupiny. [1]

3.2 Střídavé napájení

Střídavé napájení umožnilo použít podstatně vyšší napětí a tím i přenos vyšších výkonů s menšími ztrátami při větších vzdálenostech napájecích stanic. Používá se prakticky výhradně pro železnici. Nezbytné použití transformátoru ve vozidle sice vozidlo komplikuje a představuje výrazný nárůst hmotnosti, na druhé straně však umožňuje optimální volbu napětí motoru a použití hospodárné regulace i při stupňové regulaci napětí.

Nejrozšířenější soustavy:

- 15kV, $16\frac{2}{3}$ Hz zavedena počátkem století pro první elektrifikované železnice v Německu Švýcarsku, Rakousku a Skandinávii. Snížený kmitočet si vynutily možnosti střídavého komutátorového trakčního motoru, který byl prakticky výhradně používán (vznik transformačního napětí a v důsledku toho zhoršené komutace)
- 25kV, 50Hz(60Hz v USA a částečně Japonsku), jejíž prudký rozvoj souvisí se začátkem výroby křemíkových diod v 60. letech. [1]

4 Vývoj konstrukce trakčních motorů v období 1924 až 1949

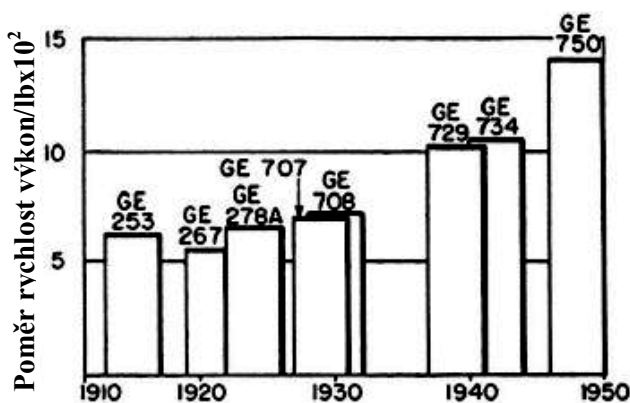
Trakční motory jsou navrhovány primárně, aby měly nízkou hmotnost, což je zejména nutné pro trolejbusy. A dále do jistého stupně i rychlost přepravy. U diesel-elektrických lokomotiv, kde motor potřebuje hodně místa na výšku, jsou také důležitá malá kola. Větší váha motorů u trolejových lokomotiv je přípustná, protože by se musela použít přídavná zátěž, aby se dosáhlo potřebné váhy. Velké a těžké motory navýšily cenu lokomotiv více, než se ušetřilo na přídavné zátěži. Účinnost hraje velkou roli při návrh trakčních motorů, jakékoliv zvýšení účinnosti, i když dosažené za cenu zvýšení hmotnosti je vyváжено právě tím, že musí táhnout tuto váhu, která je navíc. [2]

4.1 Porovnání motorů rychlost/výkon

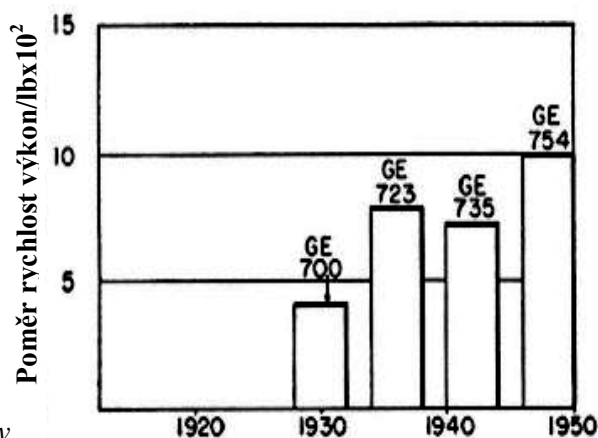
Tyto dva parametry jsou důležité při volbu použití trakčních motorů:

- Trvalý jmenovitý výkon
- Poměr maximální dovolené a jmenovité rychlosti

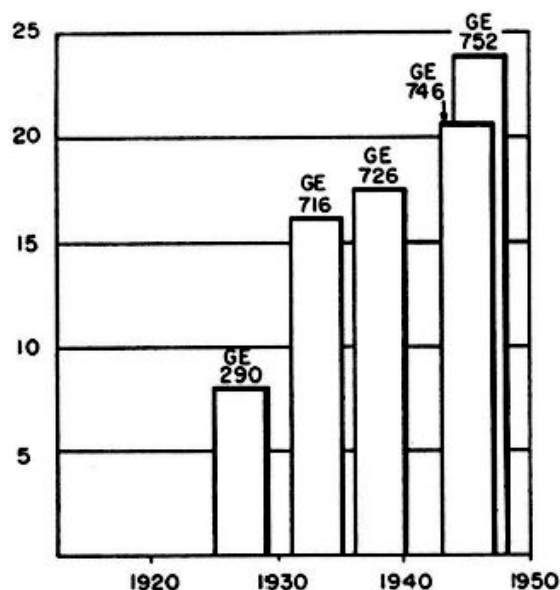
První parametr – jmenovitý výkon nepotřebuje žádný další komentář, protože obecně je hlavní a ne-li jediný, dle kterého se porovnává. Trakční motor musí být dimenzován na relativně malou rychlost a musí být schopen provozu při maximální dovolené rychlosti v rozmezí 2 až 5 násobku jmenovité rychlosti. Kdyby mohly být ignorovány mechanické ztráty při rychlostech a poměr mechanického a elektrického materiálu byl konstantní, tak by motor s poměrem rychlostí 5, měl pěti násobek tažné síly, váhy a velikosti čistě hypotetického motoru stejného výkonu posuzovaného pouze při maximální dovolené rychlosti. Výsledek parametrů poměru maximální a jmenovité rychlosti a jmenovitého výkonu je zde nazýván poměr rychlosti a výkonu a je použit pro srovnání pokroku jednotlivých řad motorů, viz obr.č.5 až č.11. Nárůst je v rozmezí 70 až 300% a závisí na použití. Poměr rychlosti a výkonu je přesně měřítko v případě, že je použito pro porovnání motorů, jejichž obvodová rychlost se liší jen minimálně. Každopádně se předpokládá, že chyba při porovnání různých aplikací motorů nebude vyšší jak 5%. [2]



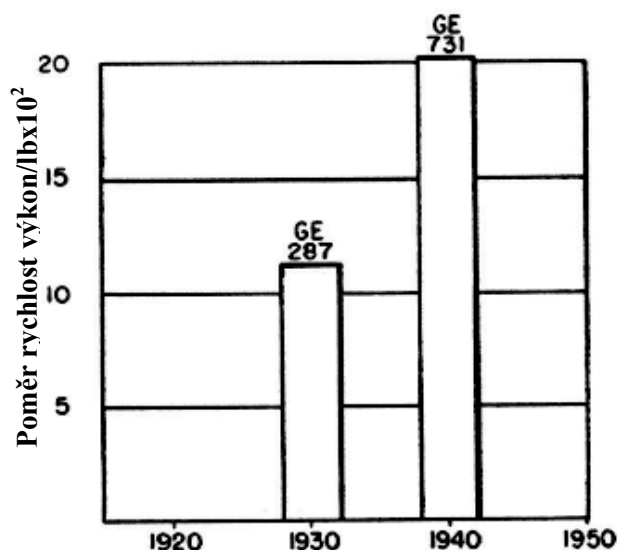
Obr. 5 - Vývoj výkonů - 3 kV lokomotivové motory, [F5]



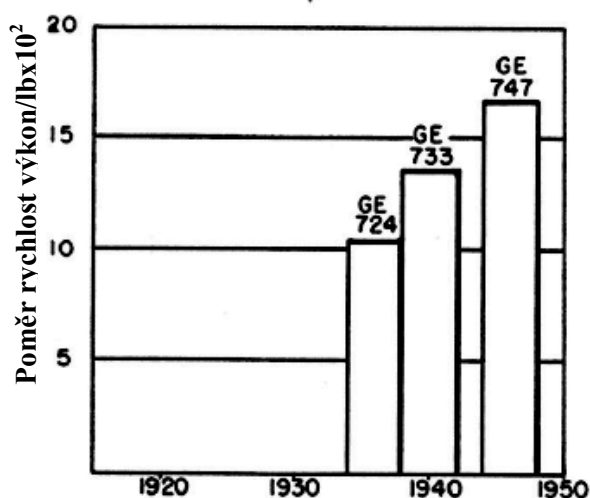
Obr. 6 - Vývoj výkonů - 3 kV vícejednotkové lokomotivy, [F6]



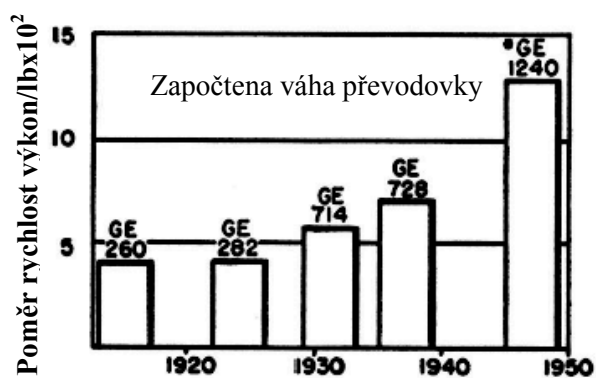
Obr. 7 - Vývoj výkonů - Nákladní lokomotivy s nezávislou trakcí, [F7]



Obr. 8 - Vývoj výkonů - Těžké posunovací lokomotivy, [F8]



Obr. 9 - Vývoj výkonů - Lehké posunovací lokomotivy s nezávislou trakcí, [F9]



Obr. 10 - Vývoj výkonů - 600 V vícejednotkové lokomotivy, [F10]

4.2 Nový typ rotorových ložisek

První znatelná změna, která nastala v těchto 25 letech, byl přechod z kluzných ložisek na valivá, což vedlo bezpochyby ke snížení ztrát točivého momentu při rozjezdu studený motorem.

Valivá ložiska mají 3 výhody oproti kluzným:

- Ve vysokých rychlostech pracuje s jednoduchým a spolehlivým mazáním
- Potřebuje méně axiálního prostoru, čímž uvolní místo pro činný materiál
- Nepatrné opotřebení, které působí, umožňuje lepší údržbu středu soukolí

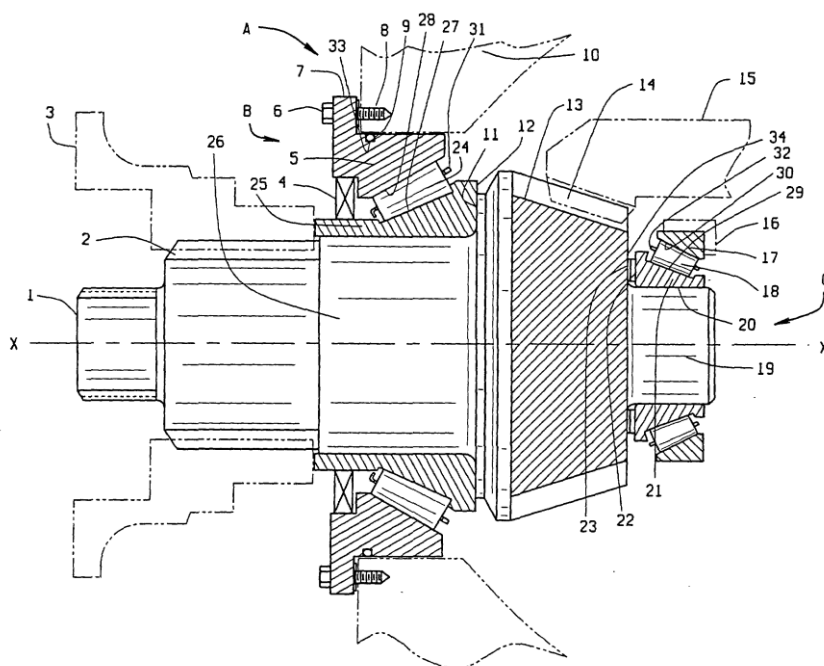
Základní problém spočívající v použití valivých ložisek je aby mazivo zůstalo v ložisku a voda nebo nečistoty venku. Celkem dobře to bylo vyřešeno pro tuk. Olej je ideální mazivo pro valivá ložiska a je jej potřeba jen malé množství. Úniky a vypařování oleje ztěžuje utěsnění, protože tyto úniky musí být nahrazeny. Při použití oleje je možné jej dodávat dostatečné množství pro ložisko u pastorku ze skříně převodovky. Běžná praxe je, že ložisko na straně komutátoru je mazáno tukem. [2]

4.3 Převody

Na počátku tohoto 25letého období bylo u velkých trakčních motorů obvykle používáno dvojitého převodu. Byly potřeba dva pastorky, ozubená kola a kryty ozubených kol, na každém konci rotorového hřídele byl pastorek převádějící moment na ozubené kolo na nápravě lokomotivy nebo náboji kola. Rovnoměrné zatížení ozubených kol bylo dosaženo pružinami mezi věncem a středem každého ozubeného kola, tangenciální pohyb je mezi dvěma částmi pružiny dovolen. O 20 let později byl dvojitý převod nahrazen jednoduchým převodem používající pevného ozubeného kola, pastorku a skříně převodu. Touto změnou získaný axiální prostor mohl být použit pro aktivní materiál v jádru motoru a způsobila znatelné snížení ceny.

Zrušení druhého převodu bylo umožněno výsledným zlepšením údržby středů ozubených kol díky použití valivých ložisek v rotoru. Ale také byla provedena zlepšení v základní konstrukci ozubených kol a pastorků. Ozubená kola staršího dvojitého převodu byla obrobená a tepelně zpracována ale přesto ponechána relativně měkká umožňující opotřebení v provozu aby se vyrovnaly úchyly při obrábění jednotlivých zubů a mezer mezi nimi. S vyvinutím nástrojů pro broušení zubů po tepelné úpravě se mohl začít používat tvrdší a pevnější materiál. Úhel záběru zubu byl zvýšen, aby se dosáhlo větší síly v ohybu. Dvě malá zaoblení a tangenciální část spojující sousedící zuby nahradilo jedno dlouhé zaoblení z důvodu snížení namáhání v náboji pastorku a věnci. Broušení profilů zlepšilo rozdělení zatížení zubu a minimalizovalo torzní napětí v rotorovém hřídeli způsobeném rozdílnou velikostí mezer mezi zuby.

Další způsob získání vysoké redukce je, že pastorek je nedílnou částí krátkého hřídele podepřen ložisky z obou stran. Tomuto se říká uložení ve dvou kuželíkových ložiscích obkrožmo, viz obr.č.11, takto uložený pastorek může být malý. Využívá se toho tam, kde je převodová skříň odděleně od motoru jako například u motorů připevněných ke karosérii například v tramvaji. [2]



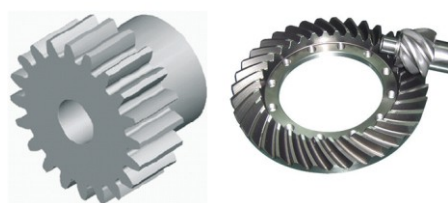
Obr. 11 - Uložení ve dvou kuželíkových ložiscích obkročmo, [F11]

4.4 Motor s dvojitou redukcí

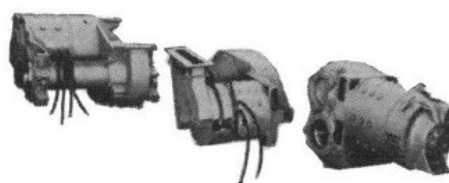
V posledních desíti letech tohoto období se u posunovacích lokomotiv nezávislé trakce rozšířilo použití trakčních motorů s dvojitou redukcí. Motor obvyklého typu uveden na obr.č.13 má dvě redukce:

Vysokorychlostní je čelního typu, nízkorychlostní je hypoidního typu.

Ložisko u pastorku a obložení nápravy je mazáno olejem ze společné lázně. Pouze ložisko na straně komutátoru je mazáno tukem. [2]



Obr. 12 - Čelní typ (vlevo), hypoidní typ (vpravo), [F12,F13]



Obr. 13 - Motor s dvojitou redukcí, [F14]

4.5 Komutátor

Navýšení rotorových otáček bylo hlavně umožněno zlepšením komutátorů.

U všech vysokorychlostních motorů jsou komutátory vysoustruženy. Tento proces se skládá cyklů zahřívání, během rychlého otáčení, chlazení a napínání, tyto cykly se opakují, dokud není povrch komutátoru hladký a relativně neovlivněn změnami rychlosti nebo teploty. Tento proces je drahý ale nezbytný pro dosažení dobrých komutátorů pracujících při rychlostech 3048 metrů za minutu,

používaných v motorech vlaků. Od roku 1925 je nárůst soustružení komutátorů, detaily výroby jsou neustále předmětem vývoje kvůli získání lepších komutátorů.

Několik nejnovějších motorů bylo místo obvyklých V-bound komutátorů vybaveno Arch-bound komutátory. V tak zvaném V-bound typu jsou lamely svírány axiálně mezi úseky tvaru písmena V bez vyvinutí velkého tlaku mezi lamelami. Z těchto dvou typů má Arch-bound komutátor lepší povrch a potřebuje méně soustružení. [2]

4.6 Kartáče

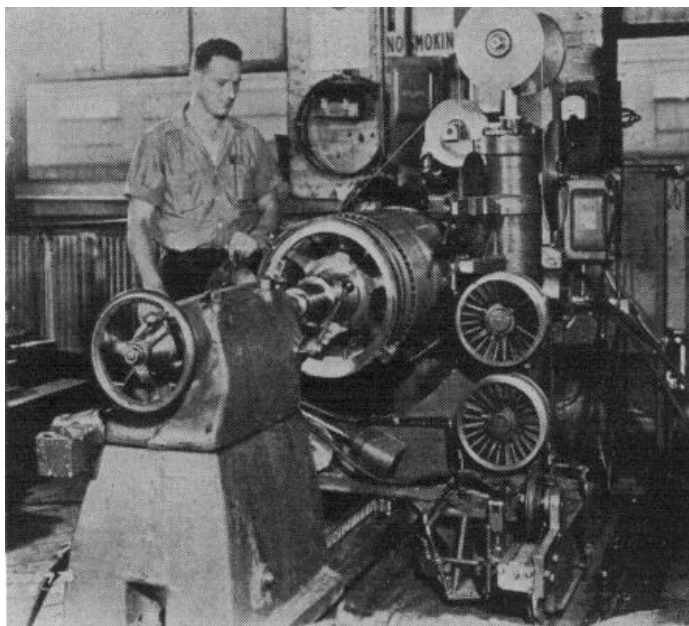
Zároveň s vylepšením komutátorů byly vylepšeny i kartáče. Kartáče mající porézní povrch se ukázaly nedostatečně pružné na to, aby sledovaly povrch komutátorů. Od roku 1941 se začalo rozšiřovat použití děleného kartáče skládajícího se ze dvou částí, každá poloviční tloušťky obvyklého pevného kartáče. Změny v materiálu a také rozdělení kartáče vedly k lepšímu styku kartáče s komutátorem, zejména pak ve vysokých rychlostech, čímž znatelně zlepšila komutace. [2]

4.7 Svazování a drážkování

Vinutí většiny rotorů bylo umístěno v drážkách, kde bylo původně vázáno pomocí drátu z magnetické oceli, až do vyvinutí nemagnetické oceli, která byla používána v případě potřeby jako prostředek ke snížení mezidrážkového toku a tím zlepšení komutace, dále snížení ztrát vázání a tedy zvýšení výkonu. S dalším nárůstem rychlosti a tím korespondující nárůst potřeby svazovacího drátu, bylo nezbytné kolem roku 1930 začít používat drážkové klíny. Tato změna zcela eliminovala ztráty ve vázání a zlepšila odvod tepla ze zubů jádra. Rychlosti jádra se blížily k 4000 metrům za minutu při nejvyšší dovolené rychlosti vozidla. [2]

4.8 Převíjecí obvazování

Aby byly konce vinutí pevně přivázány, začalo se u některých vysokorychlostních motorů používat tzv. převíjecí obvazování. Postup byl následující, umístí se vrstva svazovacího drátu, který se na koncích ukotví, ale jedno vlákno vede přes kladku, která napne tuhle smyčku a odstraní všechna prověšení. Drát je navíjen přes kladku, zatímco se horký rotor otáčí, viz obr.č.14, a napnutá smyčka cestuje po povrchu vinutí a rovnoměrně rozděluje tlak na všechny

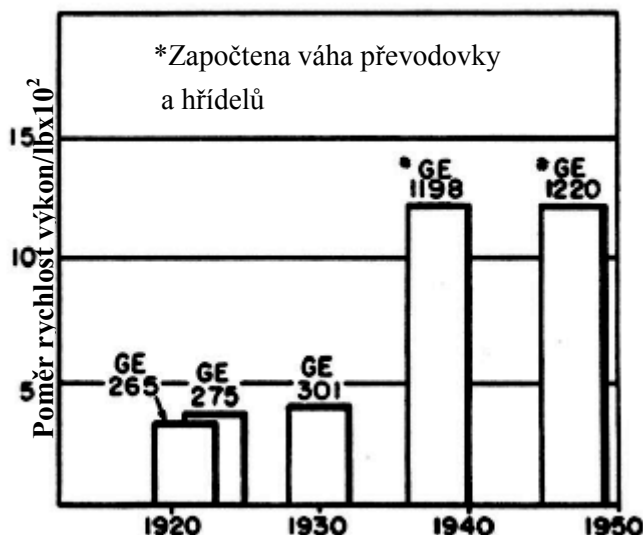


Obr. 14 - Aparát používaný při převíjecím obvazování, [F15]

části vinutí. Během svazování je v jádře podél cívek v horní části každé drážky dočasně umístěna ocelová tyč. Tyto tyče se mohou pohybovat radiálně a jsou dostatečně silné, takže tlak vázání je přenesen přes ně na hlavní část vinutí. Tlak je zachován prostřednictvím závitů drátu, dokud nezůstanou žádná prověšení. [2]

4.9 Motory připevněné ke karoserii vozidla

Ve většině malých kolejových vozidel, jako jsou tramvaje, byly motory umístěny přímo na hřídeli, od čehož bylo upuštěno ve prospěch motoru připevněných ke karosérii vozidla. Spojení mezi motorem a převodovkou byl pomocí zdvojeného Kardanova kloubu podobného jaký se používal v nákladních autech. Relativně vysoký redukční převod je možný v převodovce automobilového typu. Odpovídající nárůst v poměru rychlost a výkonu na jednotku váhy, v porovnání se staršími vozy, je vidět na obr.č.15. [2]



Obr. 15 – Vývoj výkonů - 600 V tramvaje, [F16]

4.10 Ventilace

Ventilace byla zesílena u většiny trakčních motorů, zejména u těch větších, které jsou ofukovány silněji, než bylo před pár lety pokládáno za ekonomické. Dřívější trakční motory byly stavěny tak, že spoléhaly více na tepelnou kapacitu než dnešní motory. Před 30 lety byly motory větrány řadově, tato praxe omezovala množství vzduchu, které mohlo být foukáno skrz rotor. Dnes jsou prakticky všechny motory větrány tak, že vzduch proudí strojem dvěma paralelními cestami, jedna je skrz rotor a druhá vzduchovou mezerou a mezi cívkami statoru. V případě motorů izolovaných na 600V nebo méně, byla za posledních 10 let zvýšena rychlost proudění vzduchu z 15 m/s na současnou hodnotu 25 m/s. U motorů izolovaných na vyšší napětí byla silnější ventilace shledána v důsledku tepelného odporu dielektrika zbytečnou. [2]

4.11 Izolace

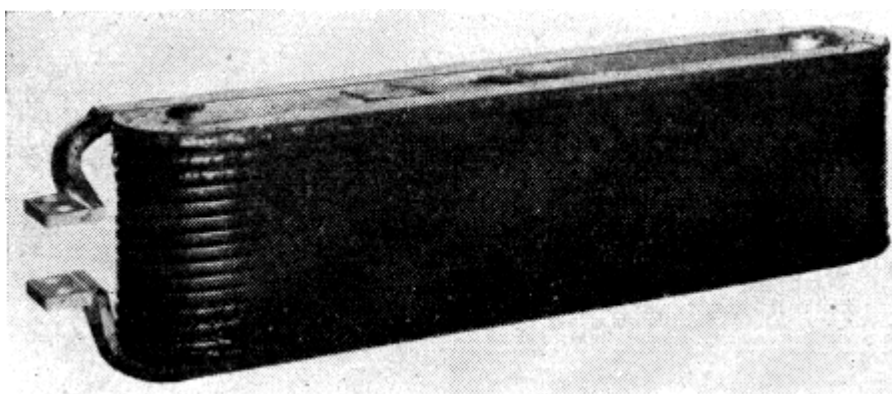
Velikost motoru je do jisté míry ovlivněna silou izolace. Tlustá izolace nejenže ubírá prostor pro měď nebo ocel, ale taky zvyšuje tepelný odpor cesty, kterou musí teplo z mědi uniknout. Problém je získat dobrou izolaci, která může být použita v normálním provozu, aniž by se poškodila a byla minimálně v teplotní třídě B.

Materiál izolace s teplotní třídou A se u dnešních motorů nepoužívá. Slída byla a je základním materiálem izolace v teplotní třídě B. Slídové izolační pásy a listy byly vylepšeny

použitím tenčího papíru. Tento nově vyvinutý materiál má šířku přibližně 0,5 milu, což je polovina dřívějšího, přičemž má dostatečnou pevnost. Nárůst využívání skloslídové izolační pásy úplně vytěsnil izolační materiál teplotní třídy A.

Skleněná vnější ochranná izolace z velké části nahradila azbest. Sklo má větší pevnost v tahu, což umožnilo těsněji jej utáhnout kolem cívek a tím ušetřit část místa.

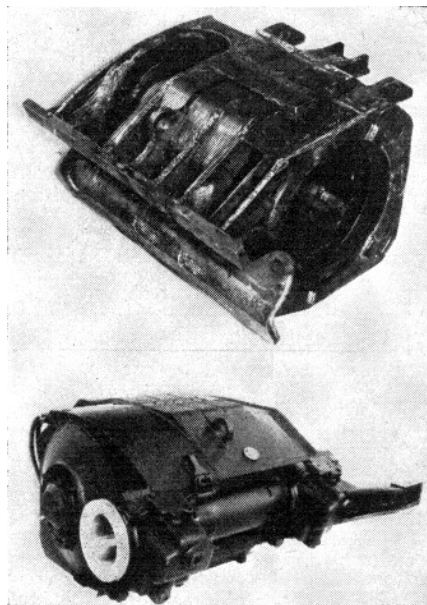
Změna v metodě izolování komutačních cívek u motorů pro použití v lokomotivách nezávislé trakce byla představena přibližně před 8 lety, kdy takzvaná mumifikace, při které je cívka kompletně slepená, byla zavrhnuta z důvodu zbytečné velikosti a váhy pro takový provoz. Místo prvních dvou až tří obtočení jsou samostatně slepeny se zemní izolací a poskytuje plnou tloušťku na krajních závitech a zúžení izolace sníží počet obvinutí vnitřních závitů. Závity uprostřed jsou ponechány holé. Komutační pól je obalen izolací, cívka je složena na pólu a celý útvar je impregnován v syntetickém laku, upnut do bloků pro nasimulování montáže ve stroji a poté vytvrzen v peci do prakticky nestlačitelného pevného dílu. Cívky právě popsaného typu jsou používány v malých lokomotivách, kde je nutné pouze jedno připojení motorů. Ve větších lokomotivách, kde dvoumotorová kombinace způsobuje nezbytný provoz budících cívek na potenciálu větším než zemním, podobná cívka bývá v současné době montována na kovovou špulku místo montáže přímo na tyč. Takto je to provedeno pouze pro lokomotivy nezávislé trakce. Permafil je nový syntetický reaktoplastický lak, používaný pro lepení a finální impregnaci slídové izolace. Vnitřní závity těchto cívek byly jednotlivě zality sklem. Tyto cívky byly sušeny na vzduchu, upnuty ve formě a tepelně zpracovány do v podstatě nestlačitelného pevného dílu, který se však odlišoval od menších cívek tím, že komutační pól je odnímatelný. Konstrukce je ukázána na obr.č.16. Tyto cívky byly drženy na místě na tyči za pomoci více listových, nemagnetických zpruh. [2]



Obr. 16 - Komutační cívka pro použití v motorech lokomotiv s vlastním zdrojem, [F17]

4.12 Pokles používání odlitek

V období 1924 až 1949 byl k vidění přesun části práce ze sléváren do dílen a svařoven. Většinou pouze největší kostry magnetů byly odlitky. Pokud to bylo možné, byly kostry změněny z osmihranných na zaoblené a formovány válcováním při snížení nákladů. Tam, kde prostorové omezení vyžadují obdélníkový nebo osmihranný tvar, je cena marginální a změna výroby může, ale nemusí být úsporná. Výroba statorů z ražených profilů svařovaných dohromady byla zavedena na základě pokusů. Na obr.č.17. je vidět jak tento typ kostry vypadá po svařování před obráběním a pak hotový motor. Tyto pokusné stroje byly provozovány po dobu 15 let v nejtěžších podmínkách metra. Tato konstrukce nabízí pár výhod zvláště tam, kde jsou elektrické přechodné děje náročné.



Obr. 17 – Motor s kostrou svařenou z ražených profilů, [F18]

Jestli je skládání použito nebo ne závisí z velké části na ceně, válcované plechy i ražené profily nabízejí lepší médium pro rovnoměrnější tok než odlitky, u kterých se častěji vyskytují vzduchové bubliny a pórovitost. [2]

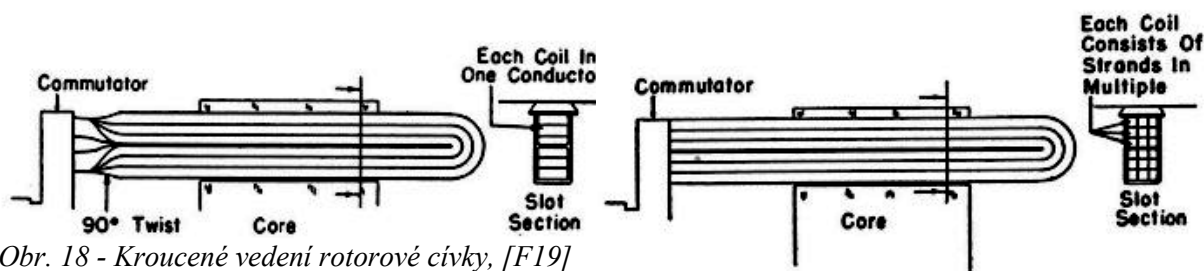
4.13 Elektrická konstrukce

I když to není tak patrné, bylo během minulých let provedeno několik změn v elektrické konstrukci. Mnoho z novějších motorů bylo vyrobeno s použitím různých typů rotorového vinutí:

Krouceného vedení rotorové vinutí obr.č.18.

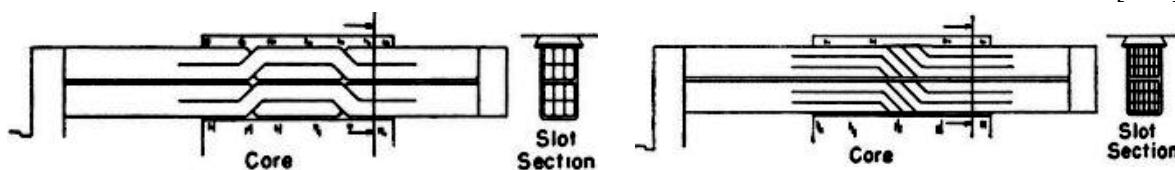
Složeného z pramenů (vodičů) obr.č.19.

Transponovaného vinutí obr.č.20 a obr.č.21.



Obr. 18 - Kroucené vedení rotorové cívky, [F19]

Obr. 19 - Konvenční vedení složené z vodičů, [F20]



Obr. 20 - Dvojité křížení tyčí rotorového vinutí, [F21]

Obr. 21 - Přeložené tyčové rotorové vinutí, [F22]

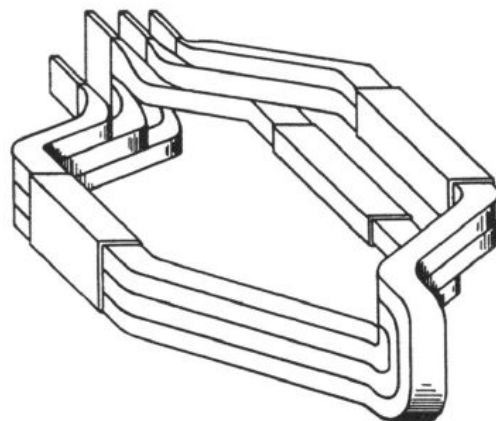
Kroucené vedení nabízí velkou prostorovou efektivitu v drážkách a nízké ztráty vířivými proudy, také cena tohoto provedení je nižší než u transponovaných typů vinutí. Právě v motorech se třemi a více cívkami na drážku nabízí kroucené vinutí zisk v efektivnosti společného prostoru a malých ztrátách v porovnání s ostatními typy, čím více cívek na drážku tím více zisk v obou aspektech. To jej činí nejužitečnější v motorech pro vyšší napětí, zejména pak při použití na 3 kV troleji.

I když použití nízkých vodičů přineslo navýšení výkonu a snížení ohřívání, problém byl ve vhodném přizpůsobení požadavkům všech cívek v drážce. Vířivé proudy vysokých vodičů mají tendenci vyrovnávat míru změny proudu v několika cívkách během komutace a také mají tendenci způsobovat, že část energie komutace se přemění spíše na teplo než na jiskření. Správné vyvážení problémů s komutací a snížení tepla byl vždy problém pro kterékoliv vinutí s nízkými vodiči použité tam, kde je komutace sama o sobě náročná.

Vinutí tyčového typu bylo po mnoho let používáno v cívkách, u kterých není zadní krok násobkem počtu cívek na drážku. Cívky tohoto typu jsou obvykle připájeny na opačné straně komutátoru, vyžadují odnímatelné čelo a speciální zalisovanou izolaci čela. Vše vedlo k tomu, aby tento typ cívky byl drahý ale byl tu jednoznačný zisk ve snížené potřebě údržby komutátoru, pokud byl typ zadního kroku použit ve srovnání s podobnými motory, kde je zadní krok násobek počtu cívek v drážce. Za účelem využití výhod krouceného vedení za použití speciálního zadního kroku tyčového typu cívky, používalo mnoho motorů modifikovanou formu cívky s krouceným vedením takzvanou „sirotčí cívku“, která je znázorněna na obr.č.22. Takováto vinutí mají porovnatelnou prostorovou efektivitu v drážkách s tyčovými typy a jsou poněkud levnější v celkových nákladech rotoru.

Kolem roku 1930 bylo shledáno výhodným zvýšení množství železa a snížení množství mědi v porovnání s dřívějším poměrem. Optimální poměr v případě rotoru byl určen na dva díly železa k jednomu dílu mědi v účinném obvodu. Tento poměr funguje dobře u motorů, které mají více jak 4 póly. U 4pólových motorů bylo zjištěno, že je lepší použít trochu vyšší procento mědi, aby se zabránilo nadměrné hustotě toku v jádře rotoru pod zuby.

Za účelem snížení napěťových špiček mezi sousedními lamelami komutátoru způsobené deformací magnetického toku byla zvětšena vzduchová mezera, jak ve středu hlavního pólu o minimální hodnotu, tak i na krajích o vyšší hodnotu. Takto rozšířené vzduchové mezery nejen snižují deformaci toku, ale také mají tendenci snižovat ztráty na krajích zapříčiněny pulzací toku způsobenou míjejícími zuby rotoru. [2]



Obr. 22 - Sirotčí cívka, [F23]

4.14 Standardizace

Velký pokrok ve všech řadách trakčních motorů v letech 1929 až 1949 byl směrem k adopci standardních strojů. Přijetí standardního tramvajového motoru jako výsledek společného vývojového

úsilí ze strany provozovatelů, jejichž vozidla konkurovala benzinovým autobusům. Podobná spolupráce provozovatelů a výrobců vyústila v ideu použití standardního motoru v trolejbusech.

Na poli elektrických lokomotiv se výrobci snažili o co největší standardizaci motoru, kterou jim dovolil různý rozchod kolejnic a různé trolejové napětí. Konstrukce v této oblasti byly však stále z velké části určovány zákazníkem prostřednictvím omezujících specifikací, i když veškeré úsilí výrobců směřovalo k přijetí norem. Když není celý motor standardní, aspoň některé části jsou co nejvíce používány v různých aplikacích.

Lokomotivy nezávislé trakce nabízely nejlepší příležitost pro standardizaci motoru s velkou škálou použití v lokomotivách různých hmotností. Motor ukázaný na obrázku 5 je používán v 25,45,50,65 a 80 tunových lokomotivách. Jsou použity různé počty motorů a jiná redukce závisící na požadované maximální rychlosti, která byla v rozpětí 40 až 80 km/h. Tento motor je použitelný na trati s minimálním rozchodem 91,4 cm.

Všichni výrobci přijali standardní motor pro nákladní lokomotivy s váhou 23 tun a více na nápravu. Generátory byly konstruovány tak, aby seděly motoru, protože náklady na generátor jsou menší než poloviční v porovnání s motory čtyřmotorové lokomotivy. Nejen, že je u motorů vyšší procento nákladů na jejich výbavu než u generátorů, ale byl také větší počet menších jednotek. Oba tyto aspekty upřednostňovaly standardizaci motorů před generátory. Je zajímavé, že motory pro lokomotivy nezávislé trakce byly zmenšovány až do bodu, kdy průměr kola nebyl určen velikostí motoru ale v případech některých těžších nákladních lokomotiv váhou na hnací nápravu, která dává tlak působící na kolej.

Tato situace byla nová a vítaná jako možná podpora standardizace motorů. Pokud bylo limitující spíše kolo než motor, dostalo se větší volnosti při výběru převodů pro malý motor nebo naopak. Čímž se otevřela cesta pro univerzálnější motor nepotřebující speciální převody.

Standardizace má sklon snižovat cenu a umožňuje rychlejší servis zejména tam, kde je dostatečně velké množství umožňující výměnu jednotky. [2]

4.15 Údržba a výměna jednotek

Vlakový motor v roce 1949 byl komplexnější, přesněji vyroben a náročnější na údržbu než pomalejší motory o 20 nebo 30 let dříve. Podobně jako v autoservisu byl problém udržet informovanost servisu trakčních motorů ohledně lepších továrních postupů. Tento problém řešila speciální, odborné školení servisních pracovníků doplněny továrním návodem. Zlepšení vázání, vyvážení a obrobení rotorů a dále lepší vybavení pro manipulaci a testování používané jak v servisech, tak v továrnách, aby se zajistila jednotná obsluha za pomoci nového nebo přestavěného vybavení. Železniční dopravci používající standardizované motory, u kterých je možná výměna, mají minimální problémy s údržbou. Provozovatel v systému výměny jednotek vymění motor potřebující údržbu za zrenovovaný motor v podstatě okamžitě. Tato metoda výměny byla nejdůležitější výsledek standardizace, která nebyla možná u zařízení postavených na zakázku podle klienta. Systém výměny jednotek rozprostřel cenu specializovaného vybavení pro údržbu na všechny uživatele daného motoru. [2]

5 Stejnoseměrný trakční motor s bezdrážkovým rotorem v roce 1985

Rychlost a výkon raných strojů byl omezen problémy s komutací, použití uhlíkových kartáčů a pomocných pólů pomohly překonat toto omezení. Dalším významným limitujícím faktorem se stal nárůst teploty, který byl vyřešen s příchodem nových izolačních materiálů schopných vydržet vysoké teploty. A tak se hledisko komutace znovu stalo aktuálním.

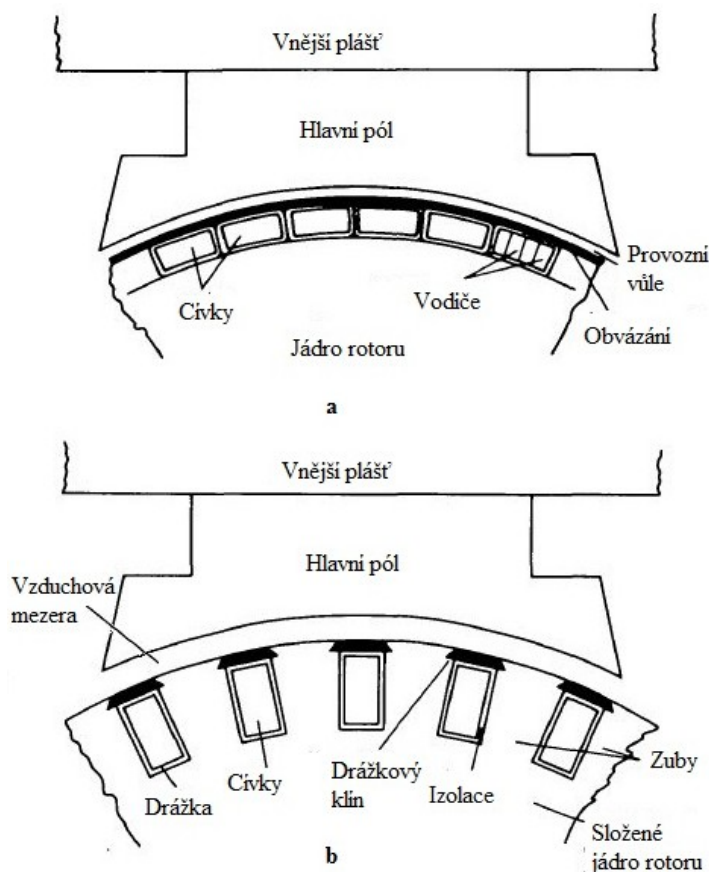
Jako reakce na obnovení významu komutace se obrátila pozornost na vinutí umístěné ve vzduchové mezeře nebo konstrukci rotoru bez drážek. V klasických rotorech s drážkami je vinutí umístěno v drážkách jádra rotoru složeného z plechů. Rozměry drážky byly typicky 40 mm hloubka a 10 mm šířka. Zhruba 60% rozptylového toku vinutí lze připsat na vrub rozptylovému poli procházejícímu drážkou.

Vinutí umístěno na povrchu hladkého rotoru, viz obr.č.23, má proto mnohem menší rozptylový tok a příslušně menší reaktanční elektromotorická síla indukovaná během změny směru toku proudu jednotlivými cívkami.

Mezi tehdejšími významná práce byla vykonaná v Sovětském svazu, uvedena Bacharovem a ostatními. V oddělení pro výzkum a vývoj Britských státních drah provedli testy malého (90 hp) trakčního motoru vybaveného experimentálním vinutím ve vzduchové mezeře. Výzkum byl proveden za účelem potvrzení zlepšení komutace, studovali charakter ztrát ve stroji a zjišťovali jejich reakci na poruchové stavy. [3]

5.1 Pokusný stroj

Stejnoseměrný sériový trakční motor AEI typ 212Z s trvalým výkonem 90 koní byl upraven, aby pojal vinutí umístěné ve vzduchové mezeře. Tento stroj byl vybrán pro svou vhodnou velikost a



Obr. 23 - Rozdíl v uložení rotorového vinutí, [F24]

a Vinutí ve vzduchové mezeře

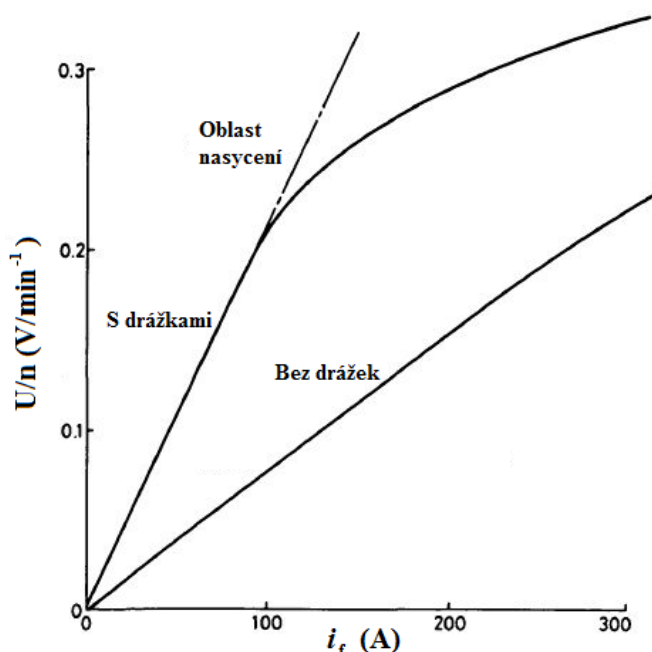
b Vinutí v drážkách

snadnou dostupnost ale nebyl skutečný zástupce účelně navrženého bezdrážkového motoru. Pokusný motor i neupravený motor byly umístěny ve zkušební stolici společně se zdrojem, zatěžovacími odpory a měřicími přístroji.

Byl zachován původní komutátor, budící a pomocné cívky. Vinutí ve vzduchové mezeře používá vedení složené ze dvou měděných pásek širokých 1 mm. Pokud by byly širší jak 1,5 mm, tak by ztráty vířivými proudy byly nadměrné. Aby se zabránilo vyrovnávacím proudům mezi dvěma pásky, jsou u zadního ohybu vinutí jejich pozice transponovány. Vodiče jsou seskupeny do cívek o 4 závitech

(46 cívek celkem). Cívky jsou izolovány materiálem zvaný Novobond, složený ze slídy, skla a epoxidové pryskyřice, je přilepen epoxidovou pryskyřicí k hladkému (bezdrážkový) povrchu složeného jádra. To poskytne dostatečnou pevnost pro vydržení očekávané velikosti smykového tření mezi jádrem a vinutím. Radiální síly působící na vinutí způsobené otáčením jsou potlačeny obvázáním nemagnetickým ocelovým drátem. Tento způsob obvázání je zvolen z důvodu jeho vysoké tepelné vodivosti, což je podstatné pro vinutí ve vzduchové mezeře. Drát musí být nemagnetický, pokud nechceme zavést nežádoucí rozptylový tok do komutačního pásma. Kvůli minimalizaci ztrát vířivými proudy je drát přiložen v několika malých skupinách. Také konce vinutí jsou přidržovány nemagnetickým drátem.

Plechý kotvy byly nahrazeny novými s menší tloušťkou, aby byl dostatek místa pro vinutí. Původní vzduchová mezera o velikosti 4 mm u středu pólu byla zvětšena na 11 mm, což ovlivnilo magnetizační křivku motoru, viz obr.č.24 pro porovnání naměřených křivek pro standardní motor a pro bezdrážkový. Zřetelný rozdíl ve sklonu ve spodní části je dán mnohem menší vzduchovou mezerou standardního motoru. Motory větších výkonů mají tendenci mít větší vzduchové mezery a tudíž by se magnetické křivky drážkových a bezdrážkových méně lišily. V horní oblasti se zuby standardního motoru nasycují a magnetické křivky obou strojů se sbíhají. [3]



Obr. 24 - Magnetizační křivky obou motorů, [F25]

5.2 Komutace

Testy pásma temné komutace proběhly u obou motorů pro potvrzení očekávaného zlepšení komutace při použití vinutí ve vzduchové mezeře. Testování proběhlo za konstantních otáček v zapojení s cizím buzením, tímto způsobem šlo přesněji udržovat určité kombinace proudu kotvy a otáček. U bezdrážkového motoru při dostupném proudu bylo pro vznik jisker potřeba vyšších otáček.

Horní a dolní křivky u obr.č.25 a č.26 (I_a proud kotvy, I_p proud pomocným vinutím) pro oba stroje dává maximální a minimální sílu pomocného pole ve vztahu k proudu kotvy, při kterém není detekováno žádné jiskření na kartáčích. Širší pásmo temné komutace a vyšší rychlost stroje s vinutím ve vzduchové mezeře dává kvalitativní podporu pro tvrzení o zlepšení komutace. [3]

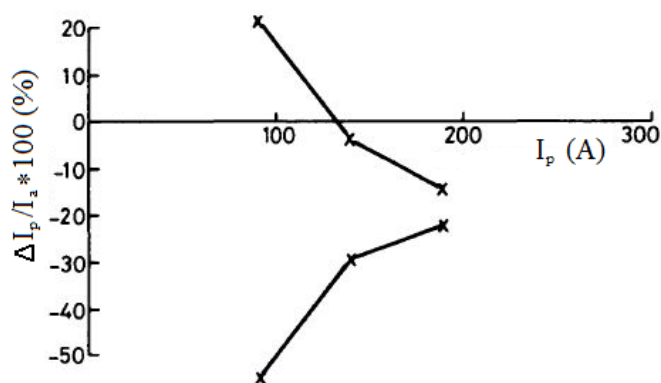
5.3 Ztráty

Při daných podmínkách zatížení a otáček, se bude charakter ztrát motoru s vinutím ve vzduchové mezeře lišit od konvenčního ve velikosti jednotlivých složek ztrát. Výpočty týkající se motoru se vzduchovým vinutím v rozsahu 250 až 1000 kW naznačovaly, že celkové ztráty ve většině provozních podmínek, by měly být srovnatelné s těmi u ekvivalentního motoru s rotorem s drážkami. Bylo zřejmé, že je nutné použít malý zkušební motor pro vyšetření charakteru ztrát, aby se zajistilo, že výhody ve zlepšené komutaci nejsou úkor účinnosti.

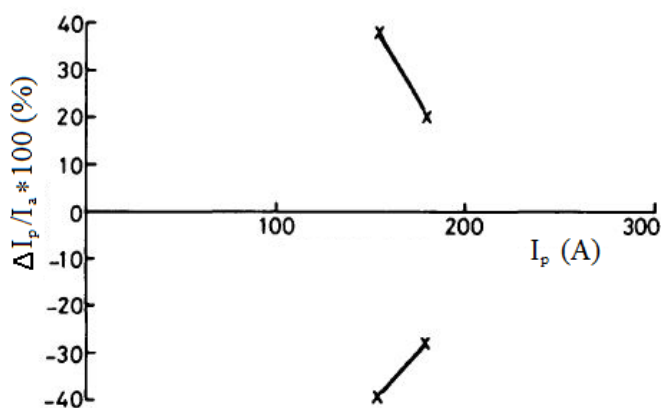
Čtyři hlavní složky ztrát ovlivněny použitím vinutí ve vzduchové mezeře:

- Ztráty v železe, protože chybí zuby
- Ztráty v budícím vinutí díky větší vzduchové mezeře
- Ztráty v rotorovém vinutí, protože může mít jiný průřez vodiče
- Ztráty vířivými proudy, protože rotorové vinutí není stíněno zuby a je použito kovové obvázaní místo izolačních drážkových klínů.

První tři byly spočteny s dostatečnou přesností, ale výpočet ztrát vířivými proudy je komplikovaný a předmětem řady nejistot. Potenciální velikost těchto ztrát u vinutí ve vzduchové mezeře učinila nezbytným provést detailní teoretické a experimentální studium za použití laboratorních motorů. [3]



Obr. 25 - Standardní motor při 1200 ot/min, [F26]



Obr. 26 - Bezdrážkový motor při 2000 ot/min, [F27]

5.4 Poruchové stavy

I když zlepšení komutace bezdrážkového rotoru a větší vzduchová mezera jej činí méně náchylným na výboj, není úplně imunní. Síly vznikající v klasickém rotoru působí převážně na zuby, zatímco u vinutí ve vzduchové mezeře jsou přeneseny na plechy v podobě smykového napětí mezi izolací cívky a lepidlem připevňující vinutí k jádru.

Za normálních podmínek je třecí napětí malé (přibližně 200 kN/m^2 při nejtěžším zatížení největších motorů), ale během poruchy se dají očekávat mnohem větší hodnoty. Je nezbytné, aby izolace a lepidlo přežily napětí při poruše, jinak by náklady na opravu byly nepřijatelný doplněk pro odhadované náklady na provoz motoru. Otázka mechanické integrity při poruchách má dva aspekty, první je, že potřebujeme znát pevnost izolačních materiálů, když jsou nanášeny a při provozní teplotě, druhý je, že potřebujeme odhad, jaké největší pravděpodobné napětí může nastat. [3]

5.5 Výsledek testů

Vinutí ve vzduchové mezeře efektivně eliminuje problém s komutací jako provozní a konstrukční omezení trakčních motorů. Výzkum pomocí 90 hp pokusného motoru prokázaly výrazné zlepšení, oproti původnímu motoru. Testy poukázaly na potenciální problémy v některých oblastech, kde budou nutné změny při konstrukci tohoto typu motoru. Největší nedostatek byla nedostatečná rezerva mezi pevností, použitého izolačního materiálu vinutí, ve smyku při vysoké teplotě a smykovým napětím, které se objeví při vážné poruše. Je potřeba najít jiné izolační materiály a provést testy pevnosti ve smyku před konečným rozhodnutím. Upevňovací pásy by měl být pokud možno z ocelového drátu kvůli nejlepší tepelné vodivosti, ale šířka jednotlivých pásů by měla být malá, aby se zabránilo velkým ztrátám. Ztráty vířivými proudy v pásech testovaného motoru jsou poměrně závažné, ale řešení je jednoduché, šířka pásů by měla být 5 mm nebo jedna čtvrtina současné hodnoty a jejich počet podle toho navýšen. To by snížilo ztráty v pásech přibližně 16krát asi až na 310 W při jmenovitém napětí 337 V. Proces umísťování pásů by byl náročnější a zdlouhavější. Alternativou je, že by se drát izoloval, aby pás netvořil spojitý list a ztráty by se prakticky eliminovaly.

Také byla potřeba změřit provozní teploty a potvrdit, že vinutí a jeho nosná konstrukce z izolace, lepidla a obvázání vydrží otřesy a vibrace, se kterými se může střetnout na lokomotivě.[3]

6 Pohled na stejnosměrné trakční motory v roce 1994

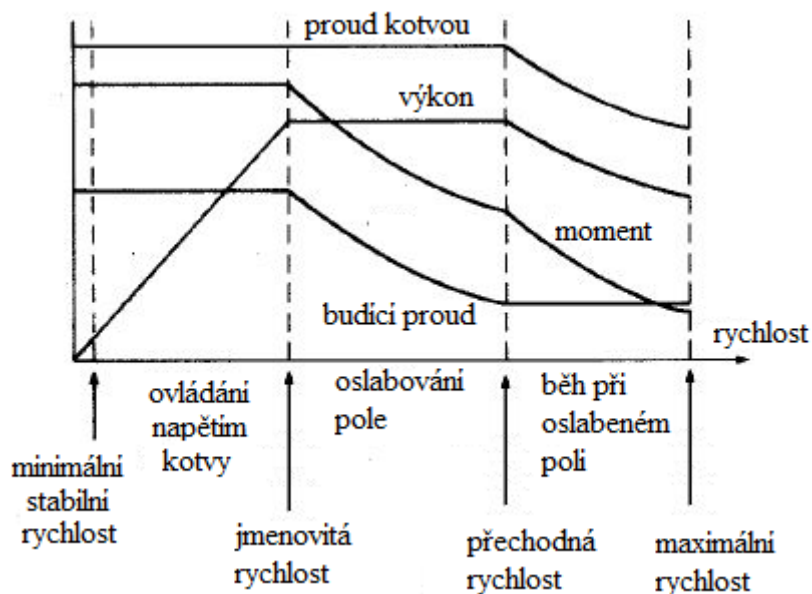
Většina trakčních pohonů použitých ve vlacích v roce 1994 jsou komutátorové stroje. Na tratích se stejnosměrným napájením většina pohonů byla po mnoho let sériově nebo cize buzený motor s odporovým řízením otáček, anebo univerzální motor s transformátorem s odbočkami a pulzním řízením na tratích se střídavým napětím nízké frekvence. V 70. letech bylo vyvinuto ovládání pomocí pulzního měniče pro sériově i cize buzené motory za použití nejnovější technologie – GTO tyristorů.

Od 50. let byly používány cize buzené motory s tyristorovými usměrňovači s přirozenou komutací na tratích napájených stejnosměrným napětím se sítovou frekvencí, představovaly hospodárnou, vyspělou technologii.

Stejnoscsměrné stroje vytváří nebo spotřebovávají moment při vzájemném působení statického magnetického pole a stejnosměrným proudem v rotoru. Trakční motory pracující s nevyhlazeným usměrněným napájením musí vydržet silně zvlněný proud a dynamické účinky. Vysoký měrný výkon vyžaduje, aby byly stejnosměrné motory otevřené a měly nucenou ventilaci, výjimkou jsou malé motory použité v tramvaji nebo u lehkých kolejových systémů. Maximální dovolený nárůst teploty je 240 K při teplotě okolí v rozmezí -10 až 40°C.

Charakteristiky sériově i cize buzeného motoru jsou vhodné pro trakci. U sériového motoru je to magnetické pole buzené proudem rotoru a nelineární chování kvůli saturaci železa. Má vysoký záběrný moment následovaný klesáním momentu s rostoucí rychlostí. Druhá vlastnost je atraktivní pro trakci, protože ze své podstaty umožňuje korekci prokluzu kol. Navíc cena stroje souvisí spíše s výkonem než s momentem

nebo rychlostí samotnou, což zajišťuje, že je motor efektivně využit při všech rychlostech. Řízení rychlosti sériového motoru je dosaženo změnou svorkového napětí pomocí sériového odporu nebo změnou buzení odporem paralelně k budicí cívce. První způsob se používá při spuštění a pro regulaci otáček až po jmenovité. Vyšších otáček je dosaženo shuntováním, což je zeslabování pole mezi hlavními póly statoru paralelně připojenými odpory k budicímu vinutí. Pokud proud



Obr. 27 - Pracovní oblasti stejnosměrného trakčního motoru, [F28]

zůstává konstantní během oslabování pole, je získaný rozsah otáček omezen z důvodu klesajícího momentu. V praxi není pole zeslabeno o více jak 65% nominální hodnoty. U cize buzených motorů je pole statoru buzeno ze zdroje odděleného od toho pro rotor. Z charakteristiky stroje je zřejmé, že pro

rotory s malým odporem je regulace rychlosti pouze 5% z celého rozsahu. Řízení rychlosti je dosaženo pomocí změny rotorového napětí nebo budicího proudu. Při konstantním proudu rotorem, klesá tok jádrem, tudíž klesá i moment. Vzhledem k reakci kotvy je rychlost omezena na 2 až 3násobek jmenovité rychlosti. Cize buzený motor je vhodný pro trakci, protože řízen tak aby vytvářel velký moment při malé rychlosti a plně využit jmenovitý výkon při vysokých rychlostech. Ačkoliv mohou sériově i cize buzený motor používat dynamické brzdění (brzdění do odporů), pouze druhý zmíněný je vhodný pro rekuperaci díky samostatnému budicímu vinutí.

Cize buzený trakční motor má tři ovládací režimy a každý z nich má specifické momentové a výkonové charakteristiky.

- Řízení napětím kotvy se jmenovitým buzením, moment je konstantní a výkon roste lineárně s rychlostí.
- Regulace buzení s konstantním proudem kotvy dávající konstantní výkon.
- Řízení změnou odporu, kde se proud kotvy, moment a výkon sníží.

Kvůli špatné regulaci byla minimální stabilní rychlost asi desetina jmenovité rychlosti. [8]

7 Třífázový trakční motor

7.1 Třífázová trakční soustava

Vícefázová elektrická soustava se v 80. letech 19. století ukázala jako hlavní průmyslová technologie, hlavně kvůli schopnosti přenášet výkon na velké vzdálenosti s relativně malými ztrátami, a hrála důležitou roli v rozvoji elektrotechniky po roce 1890.

Rané třífázové systémy byly vynikající pro distribuci na dlouhé vzdálenosti, ale použití trojfázového asynchronního motoru bylo omezeno, protože v těch dobách nebyla vhodná regulace otáček a neexistoval spolehlivý jednofázový motor vhodný pro použití na průmyslovém kmitočtu.

Třífázové motory z dob před elektronikou měly otáčky dané frekvencí zdroje a mohly je měnit jen přepínáním počtu pólů nebo změnou řazení motorů, čímž se dalo dosáhnout 4 až 5 různých rychlostí, to jej vyřadilo z hlavního použití v železniční dopravě, ačkoliv to mělo pár výhod pro použití u těžkých vlaků jezdících přes pohoří, kde otáčková charakteristika pomáhala řídit vlak v úsecích s klesáním a stoupáním. Linky pro těžkou nákladní dopravu, kde vozily hlavně vlaky s nerostné suroviny, byly vhodný kandidát pro elektrifikaci s třífázovými motory, i když se někdy rozhodli pro použití systému s rozdělením fáze. Táhnout jednu fázi z troleje a udělat z ní v lokomotivě tři fáze.

Skutečná třífázová železnice používající trojfázové napájení motorů v lokomotivách pomocí dvojitého trolejového vedení je připisována C.E.L. Brownu, který ji instaloval mezi Frankfurtem a Lauffenem, když byl zaměstnancem společnosti Oerlikon a spolupracoval Heilmannem.

Helimannovy pokusy ukázaly, že třífázový motor byl lehký na to, jaký měl výkon, a to že odstraněním komutátoru a jeho potřeby pravidelné údržby, umožněním použití rekuperačního brzdění a že byl součástí energetické soustavy větší účinnosti než běžné nízkonapěťové stejnosměrné trakční soustavy 90. let 19. století. Brown se stal stoupence trojfázových železnic navzdory potřebě dvou trolejí, ale je nutno poznamenat, že systém vyvinutý v hornatých oblastech, byl použit na hlavních tratích v místech s těžkým terénem. První použití třífázového napájení asynchronních motorů bylo na tramvaji v australském Lugarnu v roce 1896, kde Brown instaloval systém s frekvencí 40 Hz.

Roku 1897 byla elektrifikována úzkorozchodná železnice vedoucí na horu Gornergrat a v roce 1898 byla otevřena používající třífázové napájení i motory, ale první normálně rozchodná železnice využívající tento systém byla dráha mezi Burgdorfem a Thunem elektrifikovaná v roce 1899.

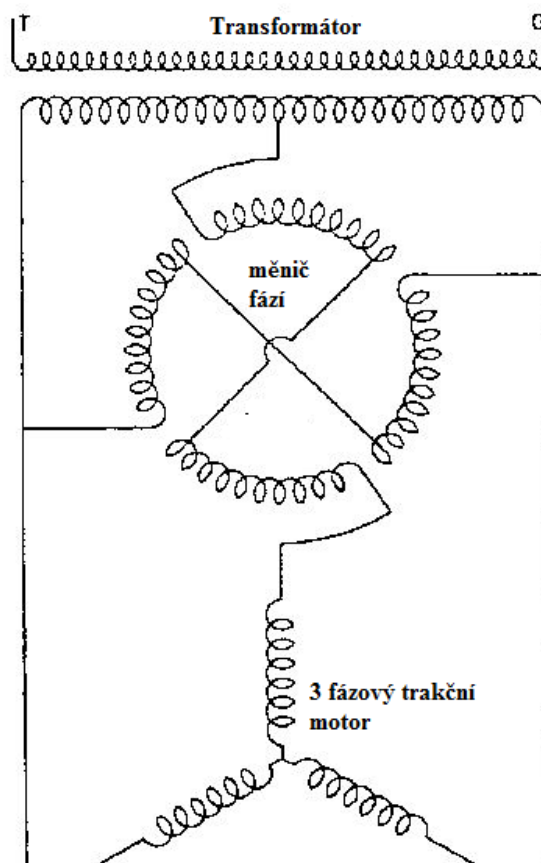
Maďarská společnost Ganz sídlící v Budapešti, která měla velmi blízký vztah s Westinghouse v USA, byla průkopníkem v elektrické trakci a zkoumala několik možných systémů včetně třífázové trakce. Její nejvýznamnější inženýr, Kálmán Kandó, ačkoliv navrhl několik stejnosměrných lokomotiv, začal být spojován se systémy určenými k používání průmyslového kmitočtu, jeho jméno je spojeno s metodou přivedení jedné fáze střídavého vysokého napětí z troleje do lokomotivy a převedení na tři fáze pomocí elektromechanických měničů, jimiž napájí trakční motory, které měly regulaci rychlosti pomocí přepínání počtu pólů a kaskádním spojováním motorů. Ganz také vyvinula skutečný třífázový systém se dvěma trolejemi podobným Brownovu. V roce 1896, Kando vyvinul třífázovou lokomotivu a roku 1899 společnost postavila v Budapešti testovací trať dlouhou 1,5 km elektrifikovanou třemi fázemi o napětí 3kV. Ganz byla konkurenceschopná společnost a na konci 19. století se zúčastnila výběrového řízení na elektrifikaci části okružních linek Londýnského metra za

použití 3kV třífázového systému, podobný tomu v Budapešti. Pravděpodobně předpokládali, že třífázový systém s omezeným počtem rychlostí by vyhovoval normálnímu provozu na okružních linkách. Ale nakonec bylo vybráno nízkonapěťové stejnosměrné napájení z třetí koleje, částečně z technických důvodů a částečně proto, že železnice byla ovládána americkou Yerkes, která následovala „Edison-Spragueho“ technickou politiku.

Ganz pokračovala ve vývoji třífázového systému používajícího frekvenci 15 nebo $16\frac{2}{3}$ Hz a jejich systém byl použit ve Švýcarsku a Itálii. Systém byl v Itálii instalován v roce 1902, v tomtéž roce byly provedeny srovnávací zkoušky mezi trakčním napájením z baterií, elektrifikací nízkým napětím ve třetí koleji a 3,4 kV třífázový systém společnosti Ganz. Třífázový systém byl testován na železnici Adriatic Valtellina, kde byly prudké svahy a je tedy nutné řídit rychlost opatrně. Dvě lokomotivy o výkonu 440 kW byly dodány v roce 1902 a úspěch systému vedl k jeho rozšíření v Itálii, i přesto se takové rozšíření v ostatních zemích nekonalo. Důležitou etapou ve vývoji byla elektrifikace tratě Giovi Italských státních drah v roce 1910, kde bylo až 3,5 % stoupání a bylo tam 6 tunelů, z nichž jeden byl dlouhý 3,2 km. Parní trakce byla nedostatečná až do té míry, že nestíhala odvážet zboží z přístavu v Janově a někdy se ho nahromadilo až 575000 tun. Bylo dodáno deset spojených lokomotiv o výkonech 1492 kW a 1940 kW napájené 3 nebo 3,5 kV s frekvencí 15 nebo $16\frac{2}{3}$ Hz. Tato trať a lokomotivy na ní provozované demonstrovaly převahu elektrické trakce nad parní a po roce 1920, kdy se Itálie zotavila z války, proběhla značná elektrifikace třemi fázemi o napětí 10 kV s frekvencí 45 Hz. Vývoj pokračoval až do roku 1933, ale rozsáhlé rozbití systému po 2. světové válce byl prohlášen zastaralým a postupně nahrazován 3 kV stejnosměrným, takže tento systém se dvěma trolejemi nad tratí kompletně zmizel a poslední úsek byl zavřen v roce 1976. Ostatní příklady použití třífázové trakce nejsou tak rozsáhlé jako v Itálii. [7]

7.2 Dělení fází

Třífázový motor napájený z jedné fáze byl s úspěchem použit v USA na Norfolk & Západní a Virginských drahách. Tato metoda používala měnič zabudovaný v lokomotivě, který měnil jednu fázi ze zdroje na tři fáze, jdoucí do motoru, E.F.Anderson byl průkopníkem, který použil motor poháněn dvěma fázemi a nazval to systém rozdělení fáze. Více obvyklé bylo použití s třífázovými asynchronními motory, které byly použity u Norfolk & Západní a Virginských drah. Obě dráhy se hodily pro třífázovou trakci s fixní rychlostí, protože tam jezdily velmi těžké uhelné vlaky přes příkré svahy a prudké zatáčky, během epochy 1910 až 1930, kdy převládaly teorie



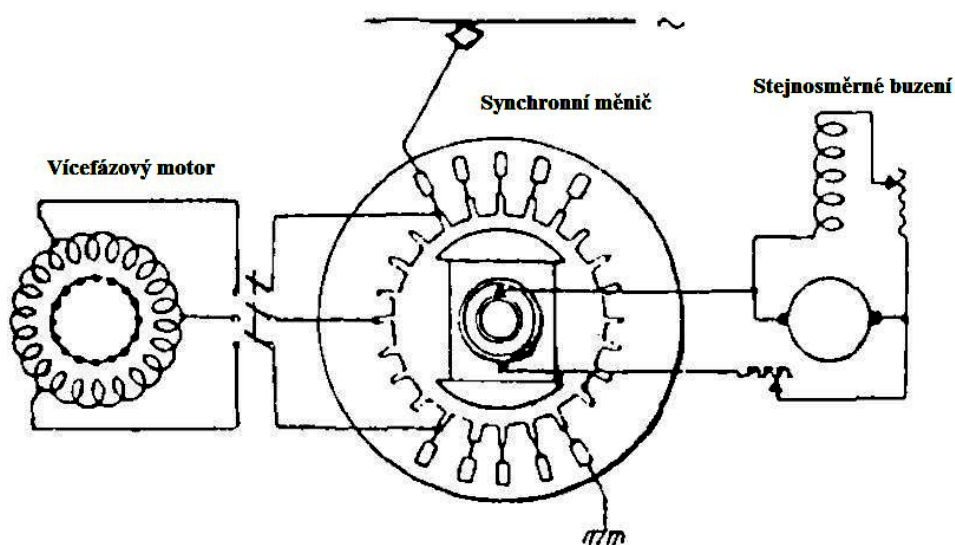
Obr. 28 – Zapojení systému „děliče“ fází, [F29]

železniční ekonomiky zdůrazňující potřebu přepravy velkými pomalými vlaky místo malými rychlejšími.

Základní princip převodu z jedné fáze na tři fáze na motoru je věc jedna, druhá věc je, že se jednalo o použití velkých a těžkých rotujících hmot, i tak se našlo několik omezených použití, byť se spíše jednalo o experiment než o běžné pracovní nasazení. V roce 1924 Krupp postavil průmyslovou lokomotivu pracující na průmyslovém kmitočtu 50 Hz, ale nehodila se pro běžnou elektrifikaci zahrnující různé druhy vlaku od místní dopravy až po expresní dopravu lidí a zboží, které vyžadují širokou škálu rychlostí. Dělení fází nepřekonalo problém s řízení rychlosti asynchronních motorů a lokomotivy spoléhaly na změnu počtu pólů a řazení motorů., které jim dávalo omezenou sadu rychlostí nevhodnou pro všeobecné použití. [7]

7.3 Systém Kandó

Před vstupem Itálie do 2. světové války byl tým společnosti Ganz pracující na třífázovém systému s dvěma trolejemi, nucen vrátit se do Maďarska. Po válce Kandó hledal jednodušší techniku, vývojem změny jedné fáze o průmyslovém kmitočtu brané z troleje na tři fáze. V roce 1925 Kandó spolupracující s Ganz sestavil prototyp známý jako systém Kandó, viz obr.č.29 a č.30.



Obr. 29 - Princip Kandóva měniče, [F30]

V lokomotivě bylo deset spojených strojů, beroucí dodávku energie z jedné troleje 16 kV 50 Hz. Maďarská lokomotiva z roku 1925, viz obr.č.31, používala synchronní měnič se stejnosměrným buzením, které napájelo třífázový synchronní motor vážící 18 tun, který poháněl kola pomocí spojnic a ojníc. Základní princip byl v přivedení jedné fáze 16 kV 50 Hz do primárního vinutí čtyřpólového měniče fází a ze sekundárního vinutí tohoto měniče byl vyveden vícefázový proud při napětí asi 1 kV do trakčního motoru. Aby se usnadnilo přepínání počtu pólů motoru, bylo sekundární vinutí měniče vybaveno 3,4 a 6 fázovými odbočkami. Do lokomotivy byl zabudován jediný trakční motor, počtem 72, 36, 24 nebo 18 pólů a odpovídající rychlostí 25, 50, 75 a 100 km/h respektive. [7]

Základní princip byl vyzkoušen také v Rakousku na jednofázové síti $16\frac{2}{3}$ Hz a byl použit u lokomotivy řady 40 Maďarských státních drah, které bylo postaveno 29 kusů mezi léty 1932 a 1934 pro 15 kV 50 Hz linku vedoucí z Východního nádraží v Budapešti do Hegyeshalom.

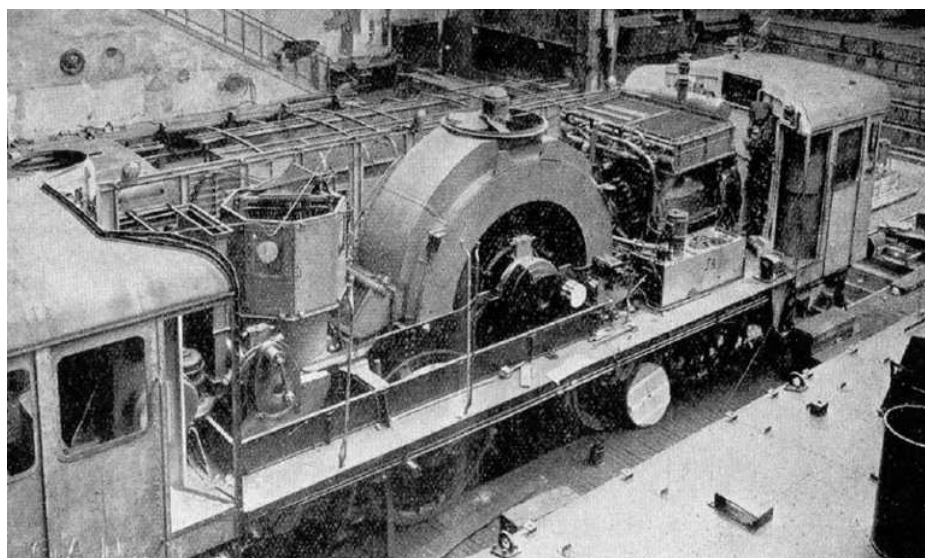
Lokomotivy byly typu 1E1 s pohonem pomocí spojnice a fungovaly dobře. Systém Kandó

používající 50 Hz byl pokládán za levnější než tehdejší systémy

používající $16\frac{2}{3}$ Hz, ale byl dražší než vysokonapěťové stejnosměrné systémy, které se objevily ve 20. letech 20. století a byly vyvíjeny v 30. letech 20. století. Kandó ovlivnil výzkumy kdekoli jinde řešící využití průmyslového kmitočtu v železniční trakci. Experiment Kandó předcházela důležitá elektrifikace Hollentalu v Německu v období 1936 až 1939, kde bylo použito napájení 100 kV o průmyslovém kmitočtu poté transformované na 20 kV a dodávané v jedné fázi aby se usměrnilo nebo konvertovalo pomocí čtyř různých metod v nejvlivnějších srovnávacích pokusech, které napomohly rozhodnutí o elektrifikaci železnic v poválečné Evropě. Jednou z alternativ zkoumaných v Hollentalu byl Kandův rotační fázový měnič. [7].

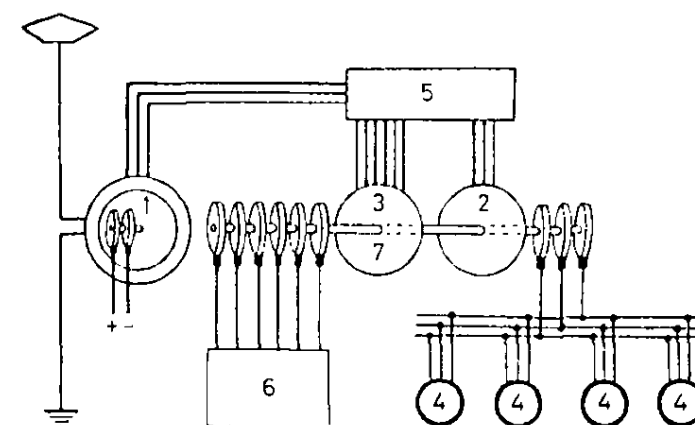


Obr. 30 – Kandův fázový měnič, [F31]



Obr. 31 - Stavba lokomotivy s fázovým měničem (uprostřed motor a napravo od něj měnič), [F32]

V roce 1940 byl systém Kandó zastaralý, ale byly pokusy o překonání závad dřívější technologie. Jeden pozoruhodný pokus vyústil ve dva dobré 2D2 stroje postavené v roce 1940 pro linku Budapešť – Hegyeshalom, které byly jedny z nejvyspělejších lokomotiv tehdy v provozu. Válka zabránila, aby byly pořádně otestovány a alespoň jeden byl zničen při náletu. Byly to velké lokomotivy (3200 kW, 5000 kVA)



Obr. 32 – Princip maďarského měniče kmitočtu, [F33]

a byly jako první na světě vybaveny zařízením pro frekvenční řízení trakčních motorů, nesoucí jak měnič fází, tak i frekvenční měnič elektromechanické konstrukce viz obr.č.32. Poválečný typ V55 obsahující frekvenční měnič, který se skládal z normálního třífázového asynchronního kroužkového stroje se statorovým vinutím napájeným z měniče fází, zatímco sekundární vinutí dodávalo proud do trakčních motorů. Bylo pět různých rychlostí 25, 50, 75, 100 a 125 km/h a lokomotivy byly schopny táhnout 1500 tun nákladu rychlostí 75 km/h nebo 750 tun osobních vagónů rychlostí 125 km/h.

V roce 1962 Krupp a AEG vyvinuli lokomotivu řady V43 pro použití na Maďarském systému, která byla schopna provozu při napájení jednofázově 16 nebo 25 kV 50 Hz. Tento typ používal křemikové usměrňovače a stejnosměrné trakční motory, což odráží tehdejší trend použít jednofázové střídavé napájení a stejnosměrné trakční motory. V té době se zdálo, že třífázové motory nebo jiné obdoby vícefázových motorů nemají budoucnost. [7]

7.4 Poválečný vývoj

Vznik spolehlivého rtuťového usměrňovače montovaného v lokomotivách a poválečné použití v USA, Francii a Velké Británii vedl k všeobecnému přesvědčení, že budoucnost leží ve vysokonapěťových stejnosměrných soustavách nebo v jednofázových střídavých soustavách s lokomotivami nesoucí usměrňovače a stejnosměrné motory. Jakmile se ekonomika dostatečně zotavila po válce, růst vnitrostátních napájecích sítí a standardizace systémů dodávající energii, usnadnil rozšířenou elektrifikaci. Při absenci jakéhokoliv hlavního elektrického vedení v Británii, poválečné zkušenosti čerpaly převážně z práce v koloniích a ze zkušeností s nízkonapěťových stejnosměrných systémů rychlých tratí a byl nedostatek zkušeností se střídavými železnicemi.

Maďarská a Německá průkopnická práce ovlivnila rozhodnutí Francie použít 25 kV 50 Hz jako budoucí standard. Což ovlivnilo rozhodnutí Británie v polovině 50. let použít stejný systém. Došlo na rozsáhlé použití rtuťových usměrňovačů a jeho modifikací, ačkoliv se pořád vyráběly lokomotivy se střídavými komutátorovými motory, byly alternativou k lokomotivám s usměrňovačem a stejnosměrným motorům.

V 60. letech perspektiva experimentů s polovodičovými usměrňovači, navrhla možnost polovodičového měniče (střídač), který pro změnu nastolil otázku zavedení třífázových trakčních motorů s frekvenčním řízením. Úspěšné použití polovodičových usměrňovačů v lokomotivách nasměrovalo k použití polovodičových střídačů společně s elektronickým řízením frekvence pružného třífázového motoru napájeného jednofázově s průmyslovým kmitočtem. Tempo vývoje bylo dáno dostupností spolehlivých AC/DC měničů. V roce 1958 byl k dispozici typický systém řízeného usměrňovače a střídače o výkonu 0,5 kVA, dávající jednofázové napájení. V roce 1959 již existovaly třífázové systémy 2,5 kVA 60 Hz a následná zlepšení byla rychlá. Rok 1960 5 kVA, 1961 50 kVA a v roce 1963 800 kVA takže do poloviny 60. let dosáhla technologie střídače stádia použitelnosti v lokomotivách. [7]

7.5 První pokusy o stavbu lokomotivy s třífázovým střídačem

První pokus pomocí polovodičové elektroniky byl proveden společností Brush, přestavil dieselelektrickou lokomotivu č. 10800, což byl průkopnický čin značného významu. Lokomotiva č. 10800, s jednou kabinou u jednoho konce, výkonu 620 kW a vážící 70 tun v provozním stavu, byla postavena v letech 1949 a 1950 společností North British Locomotive Company v Glasgow za účelem tahání lehkých nákladů střední rychlostí na kratší vzdálenosti. V roce 1962 byla přemístěna do Brushu v Loughborough, kde měla sloužit jako pokusná jednotka pro první pokus o řízení třífázových motorů pomocí polovodičovou elektronikou. Dieselelektrická jednotka byla vybrána z důvodu, aby se zabránilo možnému vzájemnému rušení s použitou elektrickou trakcí. Původní Davey-Paxmanův pohon byl nahrazen pohonem Maybach o výkonu 1007 kW, který poháněl Brushův třífázový alternátor napájen z křemíkového usměrňovače s variabilním napětím společnosti Westinghouse. Stejněsměrně napájený střídač napájel třífázové bezkartáčové motory s frekvenčním řízením použití řízení tyristory. V letech 1963 a 1964 byla lokomotiva testována po Britských drahách. V roce 1965 v testovacím středisku lokomotiv v Rugby byly zkoumány vlastnosti lokomotivy a o rok později se vrátil do Brushu v Loughborough, kde setrvala až do roku 1972. Během hornických stávek toho roku odmontovali pohon a generátor a použili je jako záložní jednotku, poté zbývající použitelné části byly odmontovány a uskladněny pro pozdější použití a zbytek lokomotivy byl sešrotován.

Autoři Tassin, Nouvion a Woimant v jejich díle naznačují, že Brushův experiment byl opuštěn příliš brzy, po tom co narazili na potíže se spolehlivostí, kvůli složitosti prvních střídačů a přidruženého vybavení. S ukončení britského průkopnického úsilí kontrastuje přetrvání německého programu, což mělo za následek ztráty iniciativy právě v době, kdy začínala být rozpoznávána praktičnost použití střídačů. Británie vzdala výzkum střídače v lokomotivě, který byl předurčen, aby se stal standardem v 80. letech. [7]

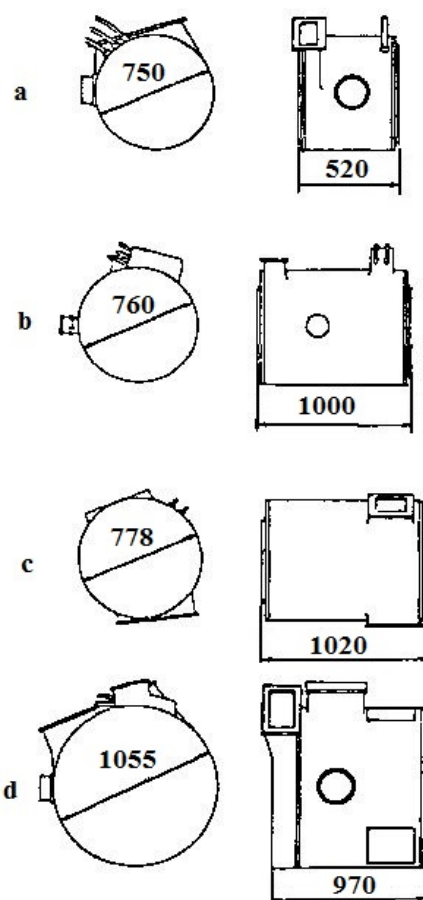
7.6 Vznik moderního třífázového trakčního motoru

Potenciální výhody třífázového motoru byly dlouho známy, v neposlední řadě nízká cena údržby v porovnání s jinými motory a jeho malé rozměry ve srovnání se stejnosměrným motorem a

jednofázovým střídavým komutátorovým motorem stejného výkonu, viz obr.č.31. Protože pokusy s použitím třífázových motorů v železniční trakci pokračovaly i po válce, v době před měničem a elektronickým řízením frekvence tyto vzácné pokusy používaly nějakou formu rotačního měniče a elektromechanickou změnu frekvence se zapojením těžkých a velkých zařízení. S dostupností polovodičových usměrňovačů se prosadilo použití třífázových alternátorů v dieselelektrických lokomotivách poháněných stejnosměrnými motory, jako prostředek snížení váhy a rozměrů komponentů a pomohla nasměrovat pozornost na možnost využití polovodičové elektroniky v železniční trakci. Po roce 1965 oddělení společnosti Brown Boveri v Mannheimu strávilo pět let vývojem systému třífázové trakce s frekvenčním řízením a v roce 1971 slavili úspěch.

Úspěšný systém byl zabudován do dieselelektrické lokomotivy č. 202 002-2 německých spolkových drah s výkonem 1860 kW, která byla testována v roce 1971. V této lokomotivě se frekvence napájení motoru pohybuje od 0,5 Hz do 165 Hz, čímž získala velký rozsah rychlosti pro provozní účely a zavedení funkční měničové techniky pochází z této lokomotivy. V několika zemích byla použita k předvedení tohoto řídicího systému a nějaký čas jezdila spojena s osobním elektrickým vlakem připojeným k troleji, který dodával stejnosměrné napájení pro její motory, aby se systém prokázal ve stejnosměrné trakci. Dvě další lokomotivy s měničem byly postaveny a jedna z nich byla upravena pro demonstraci vysokorychlostních podvozků, ve kterých mohla být hmotnost motoru přesunuta z podvozku do těla lokomotivy při rychlostech 200 nebo 250 km/h.

V 70. letech byl přijat třífázový motor s polovodičovým řízením, který překonal nevýhody dřívějších systémů převádějící jednu fázi z troleje na třífázové napájení trakčních motorů. Byla podezření, že se může jednat o přechodnou fázi a to zejména v počátcích, kdy byla řídicí elektronika znatelně rozšířená, a byla náchylná na poruchy. Proběhlo zjednodušení, zmenšení rozměrů a zlepšení spolehlivosti, od pozdních 70. let dále byla přijata s prototypy lokomotiv zkoušených v Německu, Švédsku, Dánsku a Sovětském svazu. V roce 1984 získala postavení spolehlivé a ukázkové technologie, tváří v tvář příznivcům stejnosměrných cize buzených trakčních motorů, kteří také těžili z použití elektroniky. Jakmile byla otázka spolehlivosti systému nazývaného Brown-Boveri systém vyřešena, byl systém rychle použit na širokou škálu olej-elektrických lokomotiv, od posunovacích přes osobní motorové po těžké nákladní a expresní. [7]



Obr. 33 - Různé typy motorů o stejném výkonu, [F34]

- a) Asynchronní 1400 kg,
 - b) synchronní 1700 kg,
 - c) stejnosměrný 2400 kg,
 - d) střídavý komutátorový 50 Hz 3150 kg.
- rozměry v mm**

7.7 Lokomotiva DB řady 120 a její význam

Pokud některá lokomotiva demonstrovala úspěch a obrovský potenciál systém měniče a asynchronního motoru, byla to lokomotiva DB řady 120 mezi léty 1980 až 1982. Relativně velký počet zařízení, který byl potřeba v silovém obvodu pro systém střídače, se zdál podezřelý konzervativním inženýrům, kteří argumentovali tím, že menší počet komponent byl třeba pro nejnovější lokomotivy se stejnosměrnými nebo synchronními motory navržené francouzskými státními drahami, ale víceúčelová lokomotiva E120 s výkonem 5600 kW udělala hodně pro zmírnění kritiky. Je příznačné, že byla výsledkem vývoje, který započal v roce 1974 a byl určen k průkopnictví nové pokročilé trakční technologie, obsahující systém střídače a asynchronní motor.

Důvěra v systém byla prokázána jeho použitím v hnacím vozu společnosti Thyssen-Henschel, postaveném v roce 1985, jako součást německého projektu pro provoz vysokorychlostních elektrických vlaků. První hnací vozy pro InterCity Experimental (předchůdce vlaků ICE), každý měl výkon 4200 kW po dobu 5 minut a 2800 kW neustále, přičemž byly 2 hnací vozy na soupravu. Rychlost při prvních měřeních byla 350 km/h.



Obr. 34 - Lokomotiva DB řady 120, [F35]

Prekvapení způsobilo francouzské rozhodnutí o uvažování o použití synchronních motorů v budoucím vývoji, a když byly roku 1985 představeny dva prototypy fungující na střídavém i stejnosměrném napájení. Francouzské rozhodnutí o přijetí synchronních motorů, které mohly být použity v další generaci vlaků TGV, je přímým důsledkem úspěšných experimentů s modifikovanou lokomotivou č. 10004 napájenou 25 kV 50 Hz, které během testů v letech 1982 a 1983 prokázaly, že může nahradit 3 typy lokomotiv s výkonem 4200 kW používaných pro přepravu lidí i nákladu. Testy naznačovaly, že samoregulační synchronní motor napájen ze střídače má zřejmé výhody v porovnání se stejnosměrným nebo asynchronním motorem. Avšak toto tvrzení bylo napadáno. V roce 1992 byla

zavedená praxe používat asynchronní motory a francouzská obhajoba synchronních motorů se zdála být názorem menšiny. [7]

Rok 1984 byl rozhodující, před tímto rokem se hodně diskutovalo o střídačích a jejich spolehlivosti. Po tomto roku vydané články dokládají přijetí osvědčené technologie a soustředí se na diskuzi o výhodách. V roce 1984 Dánsko vyzkoušelo svou průkopnickou lokomotivu s asynchronními motory napájenou 25 kV 50 Hz a v roce 1985 Škoda oznámila, že zvažuje asynchronní motory pro budoucí návrhy, které mají nahradit standardizované 3 kV stejnosměrné a 25 kV střídavé lokomotivy, jeden z důvodů je znatelné zkrácení lokomotivy při použití střídače a třífázových motorů, namísto stejnosměrných motorů v lokomotivách určených pro 3 kV stejnosměrné tratě bývalého sovětského svazu. Roku 1989 Railway Gazette International oznámil, že nová elektrická lokomotiva pro Jihoafrickou republiku a dieselelektrická lokomotiva pro USA budou využívat nejnovějších pokroků ve stabilizaci napájení a řízení mikroprocesory ve spojení s asynchronními motory.

Datum 4. listopadu 1989 je den, kdy Britské dráhy poprvé vezly platící cestující ve vlaku taženém lokomotivou s asynchronními motory, a bylo oznámeno, že všechny budoucí objednávky pro příměstskou dopravu Londýna budou využívat tento systém. Britské přijetí systému pro rychlíkovou dopravu následované testy s přestavěnou dieselovou více jednotkovou lokomotivou č. 457001, kterou osadili vybavením společnosti Brush.[7]

8 Počátek elektrické trakce na území Česka

Zavedení elektrického provozu na českém území spadá na počátek dvacátého století. V roce 1903 byl zahájen elektrický provoz na trati z Tábora do Bechyně, napájené dvou vodičovou stejnosměrnou soustavou 2x 700 V. Následovala trať Rybník – Lipno napájená stejnosměrnou soustavou 1,2 kV. Nejstarší elektrickou lokomotivou ve službách ČSD se stala dvounápravová E225.0, kterou navrhl sám František Křížík již v roce 1906. Pohon dvojkolí byl vyřešen jako oboustranný, dvojkolí mělo tedy dvě ozubená kola (převodovky) do každého zabíral pastorek jednoho trakčního motoru (každé dvojkolí bylo poháněno dvěma motory). V roce 1918 se začalo uvažovat o elektrizaci československých tratí, výnosem Ministerstva železnic ze dne 7. 5. 1924 bylo rozhodnuto elektrizovat tratě ČSD ustanoveným stejnosměrným jmenovitým napětím 1,5 kV. V roce 1928 byla dokončena výroba a zkoušky první lokomotivy typového označení Škoda 1 Elo, u ČSD označená jako E466.0. Pozornost zaslouží konstrukce přenosu výkonu trakčního motoru na nápravu ojníčkovou spojkou Škoda, která je původním patentovým vynálezem konstruktéra Ing. Hladíka. Rozjezdové odpory byly umístěny na střeše lokomotivy po celé ploše mezi dvěma trolejovými sběrači. Taková montáž odporů se stala tradicí Škoda až do 70. let 20. století. Provoz elektrických lokomotiv z roku 1928 zůstal stejný až do 15. Května 1962, kdy byl zastaven z důvodu přepojení na soustavu 3 kV. [5]

8.1 Elektrické střídavé lokomotivy

Již v roce 1959 se začalo uvažovat o zavedení jednofázového střídavého systému 25 kV 50 Hz. Celá mechanická část byla nově navržena v jiné koncepci, než byly dosud vyráběné lokomotivy stejnosměrné. Pro přenos tažných sil ze skříně lokomotivy na rám podvozku se použilo šikmých tyčí. Tento mechanismus umožňuje dosažení mechanického optima jednotlivých dvojkolí podvozku bez použití vyrovnávačů nápravového zatížení, jak je tomu u stejnosměrných lokomotiv Škoda. Nová je i konstrukce vedení ložiskových skříní pomocí ojníčkových mechanismů, které mají čepy uloženy v gumových pouzdrech. Ojníčky takto nahradily svislé čepy vetknuté do rámu podvozku. K přenosu krouticího momentu opět slouží kloubová spojka Škoda. Jako první byly vyrobeny čtyři prototypové lokomotivy Škoda 39 E ČSD S479.0 (původně E479.0) a 40 E S479.1 (původně E479.1) především pro vyzkoušení celé řady nových elektrotechnických konstrukčních celků, zvláště použitím křemíkových usměrňovačů u 39 E a ignitronových na 40 E. Současně s vývojem čtyřnápravových jednofázových lokomotiv byl zahájen vývoj prototypu šestiosých lokomotiv Škoda 32 E ČSD S669.0.

Nutná potřeba nových elektrických posunovacích lokomotiv dala základ vzniku nové konstrukční řady. Byl použit pohon dvojkolí tlapovými trakčními motory. První řadou lokomotiv je Škoda 33 E ČSD E458 (110) s nově vestavěnými odporníky vyrobenými z materiálu Fechral, umožňující libovolně dlouhou jízdu na jednotlivých stupních. Typ Škoda 33 E2 ČSD E426.0 (113) je jen upraven pro provoz na tratích s napájením 1,5 kV. Nahrazením odporové regulace výkonu pulzní, představující daleko hospodárnější regulaci, vzniká lokomotiva Škoda 78 E ČSD E457.0 (111). Jedná

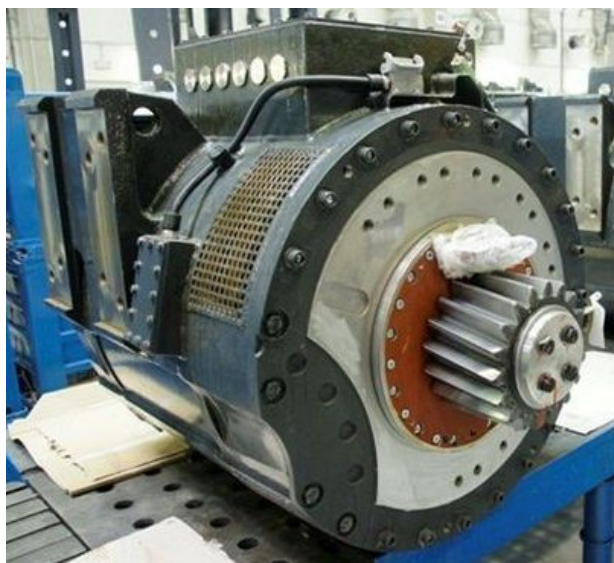
se o první sériové stroje vyráběné s tyristorovou pulsní regulací. Existence dvou proudových soustav na území ČR si vyžádala potřebu lokomotiv schopných jezdit na obou napájecích systémech bez nutnosti přepřahat. Vznikly tak lokomotivy Škoda 55 E ČSD ES 499.0 (350) Oba polopantografy mají měnitelný přítlak podle proudové soustavy, regulace výkonu je odporová, při jízdě na střídavém systému se před odporníky řadí transformátor a diodové usměrňovače. Vypuštěním střídavé části z lokomotivy 55 E, vznikla maximálně unifikovaná Škoda 65 E ČSD E499.2 (150 později rekonstruována na 151).

Samostatná kapitola vývoje tzv. III. generace Škoda s asynchronními trakčními motory započala v roce 1987 lokomotivou Škoda 85 E ČSD (169).

Lokomotiva má dva druhy zaměnitelných podvozků. Jeden s pomaluběžnými asynchronními trakčními motory pro přímý pohon dvojkolí bez nápravových převodovek, druhý s rychloběžnými asynchronními trakčními motory s pohonem dvojkolí kloubovým hřídelem. Podle podvozku se tedy mění i výkon lokomotivy. Regulace trakčních motorů je řešena současným zvyšováním napětí a frekvence až do jmenovitých hodnot. [5]

8.2 Lokomotiva Škoda 109E

Trakční výzbroj - Elektrickou energii do lokomotivy přivádějí dva univerzální polopantografové sběrače (univerzální pro všechny tři systémy) s odpojovači přes univerzální obvod indikace napájecího systému. Trakční transformátor, zavěšený zespodu na rám, mění střídavé napájení 25 kV nebo 15 kV pro vstupní obvody lokomotivy a též napájí pomocné pohony a vlakové topení. Na systému 3 kV se využívá jeho sekundární vinutí jako tlumivky vstupního filtru (spolu s další tlumivkou, protože transformátor nebyl vyráběn přímo pro lokomotivu 109 E). V lokomotivě jsou dva skříňové trakční měniče, typu 1 MS-1



Obr. 35 - Trakční motor lokomotivy Škoda 109E, [F36]

sestavující ze čtyřkvadrantového měniče, stejnosměrného meziobvodu a trakčních střídačů. Využívají vodou chlazené IGBT moduly. Každá ze dvou měničových skříní obsahuje dva trakční střídače. Každý střídač se skládá ze dvou dílčích částí, určených pro napájení asynchronního trakčního motoru. V měničové skříní jsou dále instalovány pulsní měniče pro napájení jednoho bloku brzdového odporníku. Asynchronní trakční motory typu ML 4550 K/6 s kotvou nakrátko a se satorovým vinutím zapojeným do dvojité hvězdy mají jmenovitý výkon 1 600 kW, hmotnost 2320 kg, napětí 1130 V a proud 2x 518 A. Čtyři dílčí trvale zatížitelné brzdové odporníky s výkonem 4x 550 kW umístěné ve strojovně v bloku sloupovitého provedení, jehož součástí je rovněž ventilátorové soustrojí. V režimu

elektrodynamické brzdy je napájen pulzním proudem obdélníkového průběhu ze stejnosměrného meziobvodu lokomotivy přes pulzní měnič s IGBT prvky. Pomocné pohony jsou třífázové, asynchronní. Střídače pomocných pohonů jsou napájeny ze stejnosměrné sítě 570 V. [5]



Obr. 36 - Podvozek lokomotivy Škoda 109E, [F37]



Obr. 37 - Lokomotiva Škoda 109E, [F38]

9 Závěr

V této bakalářské práci jsem vybral a uvedl různé oblasti vývoje týkajícího se trakčních motorů, konkrétně vývoj v oblasti konstrukce motoru a jeho částí, jako jsou například ložiska, komutátor, nebo rotorové drážky.

Další oblastí je motor s pokusným vinutím rotoru ve vzduchové mezeře a jeho porovnání s totožným motorem v původním drážkovaným rotorem. Tento experimentální motor měl zlepšení v komutaci, ale měl problémy s pevností izolace ve smyku a upevňovacími pásy, které drží vinutí na rotoru, kde byl problém vybalancovat šířku těchto pásů, kvůli ztrátám a jejich schopnosti držet vinutí na rotoru.

Po zevrubném pohledu z roku 1994 na stejnosměrné motory, je vývoj použití třífázových motorů, kde byl napřed problém v náročnosti vedení všech tří fází ve dvou trolejích, po přechodu na jednofázové napájení se potýkali s problémem rozdělení této jedné fáze na více a řízení velikosti otáček pomocí změny počtu pólů, tyto problémy řešily různé rotační měniče, které byly hodně velké, a tak se moc nerozšířily. Po válce přišly rtuťové usměrňovače a myslelo se, že budoucnost jsou stejnosměrné motory. Avšak v 60. letech začaly pokusy s polovodičovými usměrňovači, z nichž vyplynula možnost použití střídače, který zapříčinil, že otázka použití třífázových střídavých trakčních motorů s frekvenčním řízením se stala aktuální. Již v polovině 60. let byly střídače pro dostatečné výkony a tudíž použitelné v lokomotivách. Do 80. let probíhaly různé pokusy, kdy se technologie ukázala spolehlivou, a tak měla volnou cestu rozšířit se.

V poslední části je popsána elektrifikace tratí v České republice a vývoj lokomotiv na nich jezdících. Na konci je popis třísystémové univerzální elektrické lokomotivy Škoda 109E, která je nejnovější a první českou porevoluční lokomotivou společnosti Škoda Transportation.

10 Použitá literatura

- [1] DANZER, J. *Elektrická trakce I*. Plzeň ZČU v Plzni, 2000. 198 s. ISBN 80-7082-633-9
- [2] BALDWIN, M.J. Twenty-five Years progress in design of Traction motors. *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the* [online]. Červen 1949, s. 6 [cit. 2012-11-15].
Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5059916>
- [3] SPOONER, E. DC traction motor with slotless armature. *Electric Power Applications, IEE Proceedings B* [online]. Březen 1985, s. 11 [cit. 2013-04-10].
Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=4643836>
- [4] *Elektrická trakce*. [online] [cit. 2013-02-15]
Dostupné z: <http://maturitanazamku.kvalitne.cz/pdf/ELN25A.pdf>
- [5] PETRÁS, Jan. *Přehled elektrických lokomotiv světových výrobců*. Pardubice, 2008, 101 s. Bakalářská práce na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice.
Dostupné z: <http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/28613/1/text.pdf>
- [6] KAČOR, Petr. *Vybrané typy elektrických strojů I*. vyd. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2010, 127 s. ISBN 978-80-248-2169-6
- [7] DUFFY, M.C. Three-phase motor in railway traction. *Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings A* [online]. Listopad 1992, s. 10 [cit. 2013-04-02].
Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=173356>
- [8] HILL, R.J. Electric railway traction. I.: Electric traction and DC traction motor drives. *Power Engineering Journal* [online]. Únor 1994, s. 10 [cit. 2013-04-08].
Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=269022>

11 Zdroje obrázků

Číslo obrázku	Odkaz, zdroj	Datum	Čas
F1	KAČOR, Petr. <i>Vybrané typy elektrických strojů I.vyd.</i> Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2010, 127 s. ISBN 978-80-248-2169-6		
F2	http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/28613/1/text.pdf	18.11.2012	20:50
F3	http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/28613/1/text.pdf	18.11.2012	20:55
F4	http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/28613/1/text.pdf	18.11.2012	21:21
F5	http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5059916	15.11.2012	0:50
F6	http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5059916	15.11.2012	0:50
F7	http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5059916	15.11.2012	0:50
F8	http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5059916	15.11.2012	0:50
F9	http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5059916	15.11.2012	0:50
F10	http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5059916	15.11.2012	0:50
F11	http://www.freepatentsonline.com/6544140-0-large.jpg	10.4.2013	16:25
F12	http://www.tracepartsonline.net/PartsDefs/Production/TEA_CZR/80-20112008-794564/pictures/80-20112008-794564L.gif	10.4.2013	17:06
F13	http://www.gears.com.pk/images/HypoidGears.png	10.4.2013	17:31
F14	http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5059916	15.11.2012	0:50
F15	http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5059916	15.11.2012	0:50
F16	http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5059916	15.11.2012	0:50
F17	http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5059916	15.11.2012	0:50
F18	http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5059916	15.11.2012	0:50
F19	http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5059916	15.11.2012	0:50
F20	http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5059916	15.11.2012	0:50

Číslo obrázku	Odkaz, zdroj	Datum	Čas
F21	http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5059916	15.11.2012	0:50
F22	http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5059916	15.11.2012	0:50
F23	http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5059916	15.11.2012	0:50
F24	http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=4643836	10.4.2013	14:50
F25	http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=4643836	10.4.2013	14:50
F26	http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=4643836	10.4.2013	14:50
F27	http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=4643836	10.4.2013	14:50
F28	http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=4643836	10.4.2013	14:50
F29	http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=173356	10.4.2013	16:20
F30	http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=173356	10.4.2013	16:20
F31	http://home.tiscali.cz/cz399521/kando/pict/phexch.htm	13.4.2013	14:05
F32	http://home.tiscali.cz/cz399521/kando/pict/montaz.htm	13.4.2013	14:17
F33	http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=173356	10.4.2013	16:20
F34	http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=173356	10.4.2013	16:20
F35	http://www.eisenbahnbilderbuch.de/lokelektro-br120.php	23.4.2013	17:03
F36	http://technet.idnes.cz/tec_reportaze.aspx?c=A110215_080420_tec_reportaze_rja	23.4.2013	17:22
F37	http://technet.idnes.cz/tec_reportaze.aspx?c=A110215_080420_tec_reportaze_rja	23.4.2013	17:25
F38	http://www.objektivem.net/phprs/view.php?cislocclanku=2008070001	23.4.2013	17:35

Seznam příloh